



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Luglio 2026

Risvolti applicativi del CAM Strade.
**Caso studio relativo al bilancio delle terre di
un progetto di fattibilità tecnico-economica.**

Relatore:

Prof. Orazio Baglieri

Correlatori:

Geom. Daniele Calia

Ing. Davide Masera

Candidato:

Davide Gotter

s279669

Abstract

Negli ultimi anni, a livello europeo, è divenuto di prioritaria importanza l'obiettivo di abbattimento delle emissioni climalteranti associati alla realizzazione delle infrastrutture, indirizzandosi verso un modello più sostenibile e "verde" attraverso misure politiche e normative quali il Green Deal, il Fit for 55 e il Green Public Procurement (GPP). L'Italia, per il raggiungimento di tale obiettivo, ha adottato il D.M. 05/08/2024, introducendo per la prima volta i Criteri Ambientali Minimi (CAM) obbligatori fin dalle prime fasi di progettazione delle infrastrutture stradali. Nei progetti infrastrutturali, il movimento terra provoca, da sempre, un impatto ambientale non trascurabile sia in termini di trasporto di volumi di materiale su gomma sia di emissioni inquinanti, tra cui la CO₂. Il presente lavoro di tesi si inserisce in tale contesto, avendo come oggetto l'applicazione CAM alla gestione delle terre di un Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE) relativo a una strada di collegamento tra la S.R.10 «Padana inferiore» e l'Autostrada A33 «Asti-Cuneo» in località Rocca Schiavino. Il computo dei volumi di sterro e riporto è avvenuto utilizzando il software Civil3D, suddividendo la tratta in zone geologiche e moltiplicando i volumi di banco con i rispettivi coefficienti di rigonfiamento e di costipamento. Successivamente sono stati confrontati diversi scenari possibili legati a diverse percentuali di utilizzo del materiale di scavo all'interno dello stesso cantiere, considerando anche l'eventualità di un approvvigionamento dall'esterno di materiale riciclato necessario a soddisfare i requisiti CAM. Nell'analisi si sono utilizzati alcuni parametri, comprendenti i veicoli per chilometro (veh·km), i giorni di cantiere e la stima delle emissioni di CO₂ con fattori EMEP/EEA COPERT v5.9.1 convertiti tramite fattore IPCC 2006. In aggiunta, è stato predisposto uno schema di Capitolato Speciale d'Appalto adeguato, per la voce specifica sui movimenti terra, ai criteri CAM. L'obiettivo della tesi è di natura metodologica. A tal riguardo, i risultati dell'analisi evidenziamo la necessità, già in fase di PFTE, di determinare i reali benefici ambientali e operativi connessi all'impiego di materiale riciclato in relazione alle caratteristiche e idoneità del materiale di scavo.

Sommario

Abstract	3
Sommario	4
1 Inquadramento Normativo.....	7
1.1 Il contesto europeo	7
1.1.1 European Green Deal - Regolamento UE 2021/1119	7
1.1.2 Pacchetto “Fit for 55” e obiettivi di decarbonizzazione.....	9
1.1.3 Tassonomia Verde – Regolamento UE 2020/852.....	11
1.1.4 Il Green Public Procurement (GPP): principi e strumenti	12
1.2 Il recepimento nazionale e riferimenti tecnici.....	12
1.2.1 Il Piano d’Azione Nazionale per la Sostenibilità (PAN GPP) e il D.Lgs. 36/2023 – obbligo di applicazione dei CAM.....	12
1.2.2 Il Rapporto Carraro – investimenti sostenibili per infrastrutture e transizione ecologica	13
1.2.3 Il documento PIARC – “Decarbonizzare i processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali: quadro di riferimento, strategie e pratiche tecniche”	14
1.3 La disciplina delle Terre e Rocce da Scavo.....	16
1.3.1 DPR 120/2017 sottoprodotto vs rifiuto e i requisiti per il riutilizzo	16
2 I Criteri Ambientali Minimi (CAM) Strade.....	18
2.1 Evoluzione normativa	18
2.1.1 Dal CAM Edilizia (DM 11/10/2017 e DM 23/06/2022) al CAM Strade.....	18
2.1.2 DM 05/08/2024 e il decreto correttivo DM 11/09/2025: struttura, ambito di applicazione e aggiornamenti	19
2.2 I criteri ambientali per i movimenti terra.....	20
2.2.1 Riutilizzo delle terre da scavo: soglie minime e siti di gestione	20
2.3 Strumenti di valutazione ambientale: LCA e EPD.....	21
2.3.1 Life Cycle Assessment (LCA)	21
2.3.2 Environmental Product Declaration (EPD)	22
3 Il Progetto pilota	24
3.1 Descrizione dell’intervento	24
3.1.1 Inquadramento territoriale e infrastrutturale.....	24
3.1.2 Il PFTE: contenuti e applicazione dei CAM.....	25

3.1.3	Analisi delle alternative progettuali	26
3.2	Le opere di progetto	27
3.2.1	Le opere d'arte maggiori	27
3.2.2	Focus sui rilevati: motivazione della scelta metodologica	28
3.3	Piano di cantierizzazione e siti di gestione	28
3.3.1	Organizzazione delle aree di cantiere	28
3.3.2	Siti di gestione del materiale: localizzazione e distanze	29
4	Bilancio delle terre: metodologia e risultati	31
4.1	Metodologia e analisi	31
4.1.1	Civil3D CutFillReport e coefficienti volumetrici (ϵ e ϵ')	31
4.1.2	Il parametro di confronto: veicoli·chilometro (veh·km)	33
4.2	Dati di base – Volumi del corpo stradale	34
4.2.1	Risultati del CutFillReport per litologia	35
4.2.2	Conversione volumetrica e saldo finale	35
4.3	Definizione degli scenari di confronto.....	35
4.3.1	Scenario A – Caso limite: nessun riutilizzo	37
4.3.2	Scenario B – Caso ottimale: massimo riutilizzo in sito	37
4.3.3	Scenario C – Minimo CAM: soglia minima di riutilizzo (70%)	37
4.3.4	Scenario intermedi	38
4.3.5	Sintesi degli scenari e conformità CAM.....	38
4.4	Risultati.....	39
4.4.1	Veh·km per tratta, per mezzo e per scenario.....	39
4.4.2	Pianificazione dei trasporti	40
4.4.3	Emissioni di CO ₂ da trasporto e risparmio per scenario	43
4.5	Discussione dei risultati.....	48
4.5.1	Benefici ambientali e operativi del riutilizzo CAM	48
4.5.2	Limiti dell'analisi e possibili sviluppi	53
5	Adeguamento del Capitolato Speciale D'Appalto (CSA) ai CAM Strade	56
5.1	Proposta di schema CSA per i movimenti terra	56
5.1.1	Requisiti tecnici e operativi.....	57
5.1.2	Requisiti documentali e clausole di verifica	58
6	Conclusioni	60

Appendice A — Elaborati grafici del progetto	61
Appendice B — Tabelle di dettaglio dell'analisi	70
Appendice C — Codice Python	74
Indice delle figure.....	76
Indice delle tabelle.....	78
Bibliografia	79
Ringraziamenti	83

1 Inquadramento Normativo

Questo capitolo si focalizza sugli strumenti normativi che hanno indotto, a livello europeo e successivamente nazionale, ad accogliere delle norme che consentissero un abbattimento delle emissioni inquinanti legate al settore delle costruzioni.

Nella prima sezione viene descritta la normativa europea come si è evoluta nel tempo, nella seconda come sono state recepite le richieste UE in ambito nazionale e infine una terza parte che espone i requisiti necessari per la classificazione di un materiale da scavo come rifiuto o sottoprodotto.

1.1 Il contesto europeo

Le emissioni di gas serra sono da sempre un problema a livello globale, che però con il passare del tempo ha continuato ad aumentare, per questo motivo recentemente l'Unione Europea sta premendo verso una transizione ecologica. In particolare, secondo la Direttiva EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*)[1] si afferma che solamente il settore edilizio consuma all'incirca il 40% di energia totale e produce il 36% delle emissioni di gas a effetto serra a livello europeo. Nonostante le leggi europee siano principalmente incentrate verso il settore edilizio, l'obiettivo europeo in realtà è molto più vasto, ovvero coinvolgere le opere pubbliche e le infrastrutture.

Nel passato quando si parlava di inquinamento stradale si pensava alle sole emissioni causate dal transito veicolare, attualmente le cose sono un po' cambiate, è necessario considerare l'intero ciclo di vita delle opere, l'estrazione del materiale, i lavori per la realizzazione delle opere e lo smantellamento o riciclo del materiale che in gergo tecnico significa determinare il carbonio incorporato.

Nei successivi paragrafi si descrive l'evoluzione normativa europea a partire dall' *European Green Deal* fino ai principi e strumenti del *Green Public Procurement*.

1.1.1 European Green Deal - Regolamento UE 2021/1119

Il Green Deal è un piano strategico politico presentato con la Comunicazione COM(2019) 640 final[2] dalla Commissione Europea che ha come obiettivo principale quello di rendere l'Europa il primo continente climaticamente neutro entro il 2050, quindi cerca di coinvolgere tutte le nazioni che ne fanno parte a concentrarsi ad ottenere tale obiettivo. Il termine climaticamente

neutro significa che le emissioni nette di gas serra prodotti saranno equivalenti a zero, bilanciando le emissioni residue con gli assorbimenti naturali e tecnologici di CO₂. Il Green Deal è applicabile a tutti i settori, in particolare i principali coinvolti sono: energia, edilizia, industria e trasporti. Nello specifico le infrastrutture stradali rientrano nel settore dei trasporti in cui le emissioni sono notevoli durante tutto il ciclo di vita dell'opera, compresa la fase di cantierizzazione. Il Green Deal prevedeva inizialmente un obiettivo intermedio del 40% già in vigore con la normativa precedente; tale target è stato successivamente innalzato al 55% entro il 2030 con il Piano per l'obiettivo climatico 2030 (COM(2020) 562)[3].

La Figura 1.1 illustra il percorso previsto dall'Unione Europea verso la neutralità climatica al 2050, con il target intermedio di riduzione delle emissioni del 55% entro il 2030, come delineato nel Piano per l'obiettivo climatico 2030 (COM(2020) 562)[3].

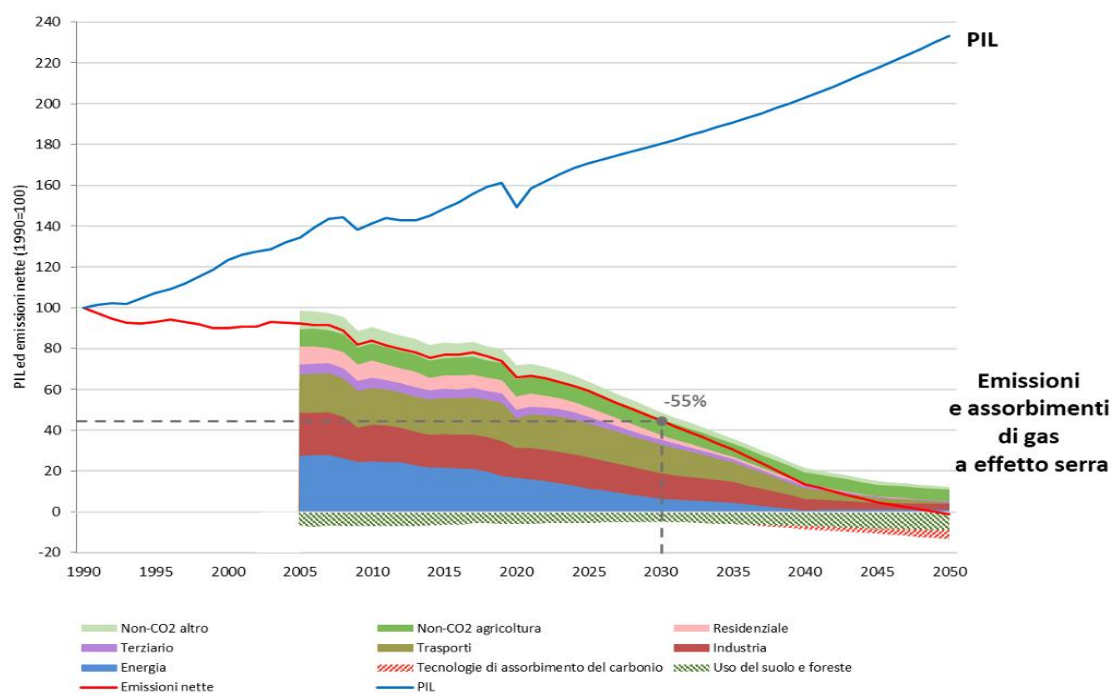


Figura 1.1: Percorso dell'UE verso una prosperità economica duratura e la neutralità climatica, 1990-2050[3].

Neutralità climatica non significa zero emissioni assolute, bensì emissioni nette pari a zero, ovvero:

$$\text{Emissioni prodotte} - \text{Assorbimenti naturali e tecnologici} = 0$$

Ciò significa che si possono ancora produrre una quantità ridotta di emissioni residue, ma devono essere compensate da: foreste e suoli che assorbono CO₂ (*sink naturali*) e tecnologie di cattura del carbonio (*CCS*).

Questo perché nei trasporti ci sono alcune emissioni difficili da eliminare completamente ad esempio: aviazione a lungo raggio, trasporto marittimo internazionale e alcuni veicoli pesanti. Le emissioni residue (~10%) vengono poi compensate dagli assorbimenti.

Il Green Deal come detto precedentemente, essendo solo un piano strategico politico, da solo non obbligava gli stati membri a seguire tale obiettivo, per questo motivo è entrato in vigore il Regolamento 2021/1119[4] che ha colmato tale lacuna. Quest'ultimo ha come target intermedio la riduzione del 55% entro il 2030 delle emissioni rispetto all'anno 1990. Inoltre, recentemente con il Regolamento (UE) 2026/667[5] del Parlamento europeo si è introdotto un ulteriore obiettivo intermedio che ha raccomandato per il 2040 un traguardo di riduzione netta delle emissioni di gas serra del 90 % rispetto ai livelli del 1990. Per spingersi verso il primo obiettivo intermedio in misure concrete è stato introdotto il pacchetto Fit for 55.

1.1.2 Pacchetto “Fit for 55” e obiettivi di decarbonizzazione

Per il raggiungimento entro il 2030 dell'obiettivo intermedio di riduzione del 55%, è stata presentata il 14 luglio 2021 dalla Commissione europea una raccolta di proposte legislative denominate Fit for 55[6] (in italiano tradotte come Pronti per il 55%). Questo insieme consente di rafforzare otto atti legislativi già esistenti inserendo cinque nuove proposte in differenti settori: clima, energia e combustibili, silvicoltura, trasporti, edilizia e uso del suolo.

Nella Figura 1.2 vengono riportate le misure previste dal Fit for 55.

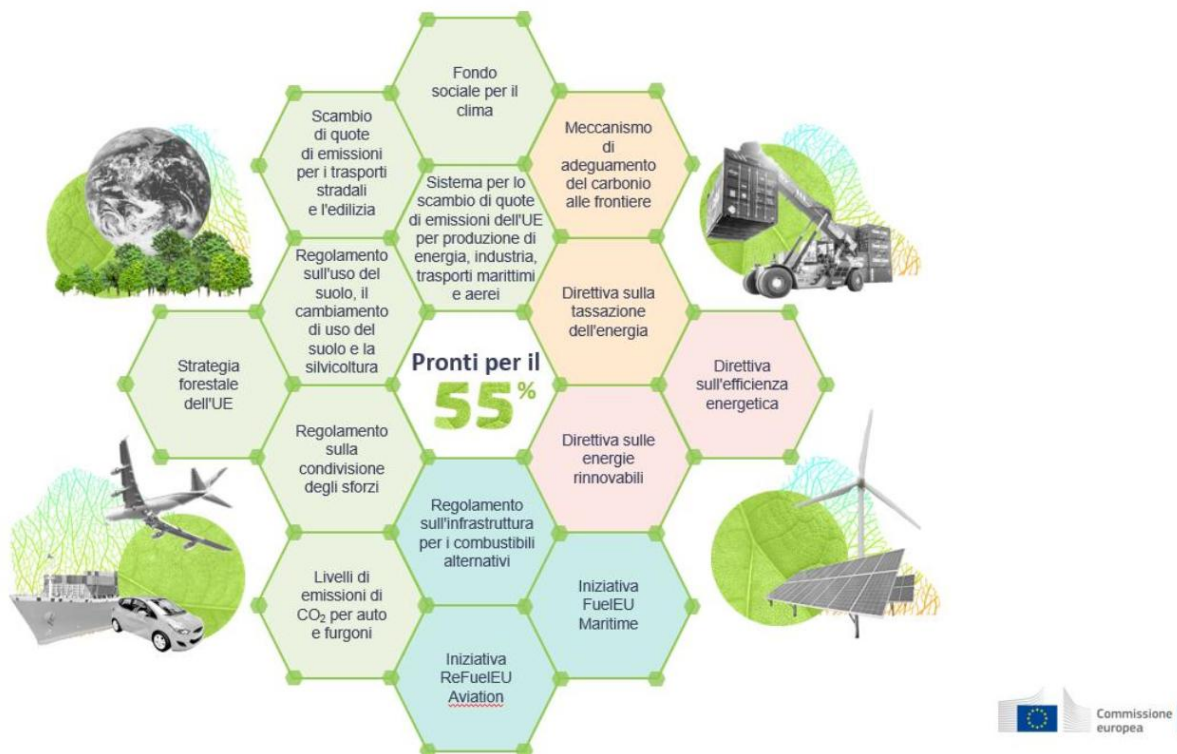


Figura 1.2: Le proposte legislative del pacchetto Fit for 55.[6].

Nel settore dei trasporti le tre misure più rilevanti sono:

- Gli standard di emissioni di CO₂ per auto e furgoni in cui i costruttori automobilistici sono obbligati a ridurre in fase di realizzazione le emissioni delle automobili e dei furgoni del 100% entro il 2030.
- Il regolamento sulle infrastrutture per combustibili alternativi dove gli stati membri devono garantire entro il 2030 l'installazione ogni 60 chilometri a livello globale di stazioni di ricarica rapida.
- L'estensione del sistema ETS (*Emissions Trading System*) ai trasporti su strada, che inizialmente era un settore escluso. Tale meccanismo funziona secondo il principio del *cap and trade* dove vengono definite dei limiti massimi di emissioni (*cap*) dallo Stato e le aziende hanno la possibilità di vendere o comprare le quote sul mercato (*trade*).

Queste misure sono di rilievo nel settore infrastrutturale stradale non solo in fase di esercizio ma anche durante la realizzazione, in quanto, soprattutto per grandi progetti, gli spostamenti su gomma dei mezzi di trasporto sono elevati e quindi non trascurabili, contribuendo significativamente alle emissioni di cantiere.

L'Unione Europea ha cercato di muovere gli investimenti verso attività economiche che fossero coerenti con gli obiettivi prefissati attraverso la Tassonomia Verde.

1.1.3 Tassonomia Verde – Regolamento UE 2020/852

La Tassonomia Verde è entrata in vigore dal 12 luglio 2020 con il Regolamento UE 2020/852[7] e rappresenta un sistema di classificazione che consente all'Unione Europea e ai suoi Stati membri di determinare se una attività economica possa essere considerata ecosostenibile. Il criterio di valutazione si basa su quattro principi cardine:

1. L'attività contribuisce positivamente al raggiungimento di uno o più obiettivi prefissati dal regolamento;
2. Non deve incidere negativamente su qualsiasi principio sostenibile;
3. Venga svolta nel rispetto delle garanzie sociali minime previste dal regolamento;
4. Vengano soddisfatti i criteri tecnici di verifica stabiliti dalla Commissione Europea.

Un'attività che rispetta i principi sopra descritti viene definita "tassonomicamente allineata" perché è conforme alla salvaguardia ambientale.

I sei obiettivi ambientali definiti all'Art.9 nel Regolamento UE 2020/852[7] sono:

1. Mitigazione dei cambiamenti climatici;
2. Adattamento ai cambiamenti climatici;
3. Uso sostenibile delle risorse idriche;
4. Economia circolare;
5. Prevenzione dell'inquinamento;
6. Protezione della biodiversità.

La Tassonomia Verde è significativa nelle infrastrutture stradali, in quanto l'economia circolare e la mitigazione dei cambiamenti climatici rappresentano un importante passo per la riduzione delle emissioni. L'economia circolare ha un ruolo importante, in quanto è direttamente correlata al riutilizzo in sito del materiale da scavo.

I criteri previsti nella Tassonomia Verde prendono un significato pratico con altri strumenti operativi già esistenti, tra cui il *Green Public Procurement* (GPP) traducendo i principi di sostenibilità direttamente nei bandi di gara e negli appalti pubblici, come illustrato nel paragrafo che segue.

1.1.4 Il Green Public Procurement (GPP): principi e strumenti

Il concetto di GPP viene introdotto a livello europeo nel 2003 con la Comunicazione COM(2003) 302[8] sulla Politica Integrata di Prodotto, che raccomanda agli Stati membri di adottare piani d'azione nazionali. Nel 2008 la Commissione formalizza il GPP come strumento di politica ambientale con la Comunicazione COM(2008) 400[9] riguardo gli appalti pubblici per un ambiente migliore. L'obiettivo era di dimostrare che la pubblica amministrazione potesse fornire un contributo sostanziale nel mercato verso prodotti, materiali e opere sostenibili. Infatti, il GPP afferma che le pubbliche amministrazioni quando acquistano o appaltano dei lavori, nella scelta tra alternative equivalenti, devono tener conto non solo dell'impatto economico ma anche del minor impatto ambientale. In questo modo, il focus sulla sostenibilità diventa nucleo centrale delle scelte. In ambito nazionale il GPP è stato tradotto nel settore infrastrutturale stradale attraverso un obbligo per le stazioni appaltanti dell'utilizzo dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) Strade, strumento operativo che costituisce il fulcro della presente tesi e approfondito nel Capitolo 2.

1.2 Il recepimento nazionale e riferimenti tecnici

La Commissione Europea ha richiesto a tutti gli Stati membri di recepire gli obiettivi prefissati, con azioni verso la sostenibilità e la decarbonizzazione. Per questo motivo i documenti più rilevanti in Italia sono: il Piano d'Azione Nazionale per la Sostenibilità (PAN GPP), il D.Lgs. 36/2023[10], il Rapporto Carraro e il documento PIARC che sono descritti rispettivamente nei sottoparagrafi che seguono.

1.2.1 Il Piano d'Azione Nazionale per la Sostenibilità (PAN GPP) e il D.Lgs. 36/2023 – obbligo di applicazione dei CAM

Il Green Public Procurement (GPP) è lo strumento con cui la pubblica amministrazione integra criteri ambientali nelle proprie procedure di acquisto, orientando il mercato verso prodotti e servizi a minore impatto grazie al peso economico della domanda pubblica.

In Italia il GPP si attua attraverso il Piano d'Azione Nazionale (PAN GPP), introdotto per la prima volta con il decreto interministeriale dell'11 aprile 2008[11] e successivamente aggiornato nel 2013[12], in cui vengono definite le categorie principali su cui applicare i criteri ambientali

minimi negli appalti pubblici, tuttavia le stazioni appaltanti erano solamente incoraggiate ad applicarli.

Con l'avvento del D.Lgs. 50/2016 (vecchio Codice dei Contratti)[13] i CAM diventano obbligatori parzialmente solo per alcune categorie e con soglie percentuali. Solo con l'introduzione del D.Lgs. 36/2023[10] (nuovo Codice dei Contratti) i CAM sono stati resi obbligatori per tutte le stazioni appaltanti in tutte le fasi dell'appalto senza alcuna eccezione. In particolare, l'art. 57 comma 2 del D.Lgs. 36/2023[10] stabilisce che le stazioni appaltanti inseriscano "nella documentazione progettuale e di gara, almeno le specifiche tecniche e le clausole contrattuali contenute nei criteri ambientali minimi".

L'obbligo riguarda quindi la documentazione progettuale fin dalle prime fasi, coerentemente con l'impostazione del presente lavoro, che applica i criteri ambientali già a livello di Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica.

1.2.2 Il Rapporto Carraro – investimenti sostenibili per infrastrutture e transizione ecologica

Un riferimento tecnico rilevante per la progettazione delle infrastrutture italiane è il Rapporto Carraro[14] redatto dalla Commissione 'Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità sostenibili', coordinata dal Prof. Carlo Carraro dell'Università Ca' Foscari di Venezia, su incarico del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS) nel 2022. Il documento analizza l'impatto dei cambiamenti climatici sulla rete infrastrutturale italiana (stradale e autostradale, ferroviaria e portuale) e suggerisce strategie verso due direzioni: la mitigazione, cioè la riduzione delle emissioni del gas serra (GHG), del settore trasporti che rispetti gli obiettivi prestabiliti dal Fit For 55[6] e l'adattamento, ovvero la progettazione di infrastrutture resilienti agli eventi climatici estremi.

Come illustrato nella Figura 1.3, il settore dei trasporti italiano dovrà ridurre le emissioni dirette di GHG da 105,5 Mt CO₂eq (situazione attuale) a 72,2 Mt CO₂eq entro il 2030, per poi raggiungere la neutralità climatica al 2050.

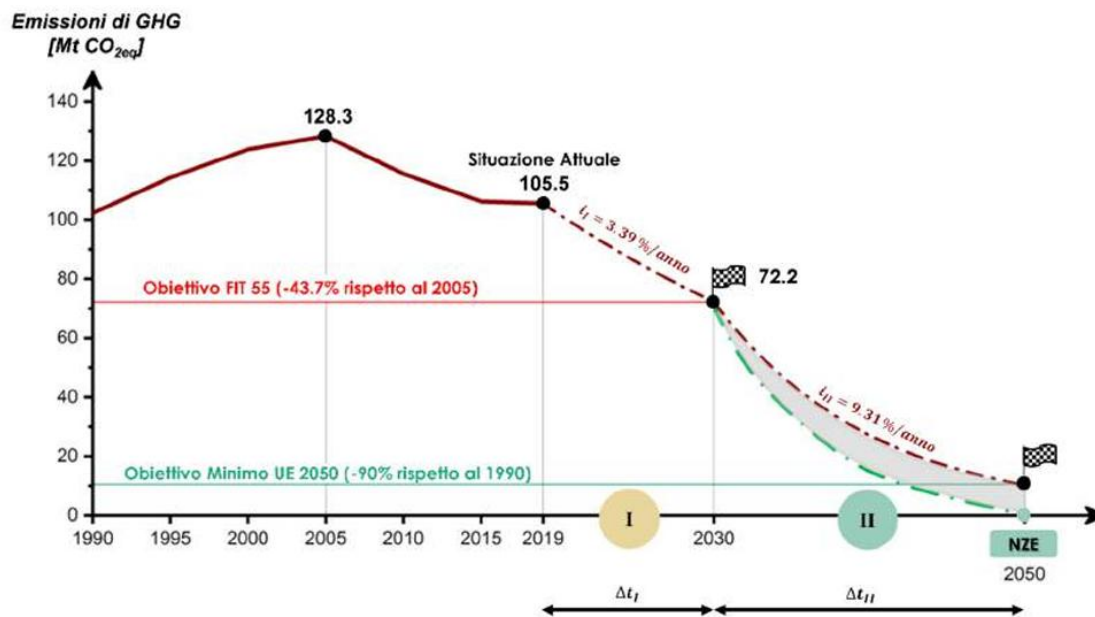


Figura 1.3: Trend delle emissioni dirette di GHG e indici di riduzione nel settore nazionale dei trasporti secondo il Green Deal Europeo[14].

Il Rapporto Carraro essendo stato redatto precedentemente aveva come obiettivo la neutralità climatica prevista nel 2050, che poi il Regolamento 2026/667[5] ha anticipato al 2040, rendendolo un target intermedio vincolante.

Per le infrastrutture stradali si introduce il concetto di “*climate proofing*” che si basa su due pilastri: *Adaptation* e *Mitigation*. Viene inoltre sottolineata l’importanza significativa già nelle fasi progettuali iniziali di applicare la valutazione dell’impronta carbonica (*Carbon Footprint Assessment*) e la *Life Cycle Assessment* (LCA).

1.2.3 Il documento PIARC – “Decarbonizzare i processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali: quadro di riferimento, strategie e pratiche tecniche”

Il PIARC è l’associazione mondiale della strada che ha pubblicato nel 2026 un rapporto tecnico coordinato dal Prof. Baglieri del Politecnico di Torino[15], incentrato sulla decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali. Il documento sottolinea come il massimo potenziale di riduzione delle emissioni si concentri nelle fasi preliminari di pianificazione e progettazione e si articola in tre ambiti: strategie di decarbonizzazione, materiali e tecnologie low carbon, impianti e cantieri. Le strategie di decarbonizzazione analizzano come integrare i criteri ambientali nelle diverse fasi progettuali, dal PFTE fino alla gestione in esercizio.

I materiali e le tecnologie low carbon includono sia soluzioni già consolidate che innovazioni in fase sperimentale, orientate alla riduzione dell'impronta carbonica dell'opera.

Per gli impianti e i cantieri vengono proposte misure per ottimizzare la logistica, i consumi energetici e i processi costruttivi, tra cui — rilevante per la presente tesi — la gestione sostenibile delle terre da scavo.

Come illustrato nella Figura 1.4, il modello gerarchico proposto dal PIARC evidenzia come il potenziale di riduzione delle emissioni raggiunga il 100% nella fase di pianificazione e progettazione, riducendosi progressivamente nelle fasi costruttive e gestionali.

Il modello si articola nei quattro livelli "Build Nothing – Build Less – Build Clever – Build Efficiently". Il primo corrisponde all'opzione di non realizzare l'opera, teoricamente risolutiva; il secondo e il terzo agiscono rispettivamente sulla portata dell'intervento e sulla qualità delle soluzioni progettuali; l'ultimo raccoglie le misure di efficientamento attuabili in fase realizzativa e gestionale, che pur incidendo meno in termini relativi restano rilevanti in valore assoluto sulle opere di grande scala[15].

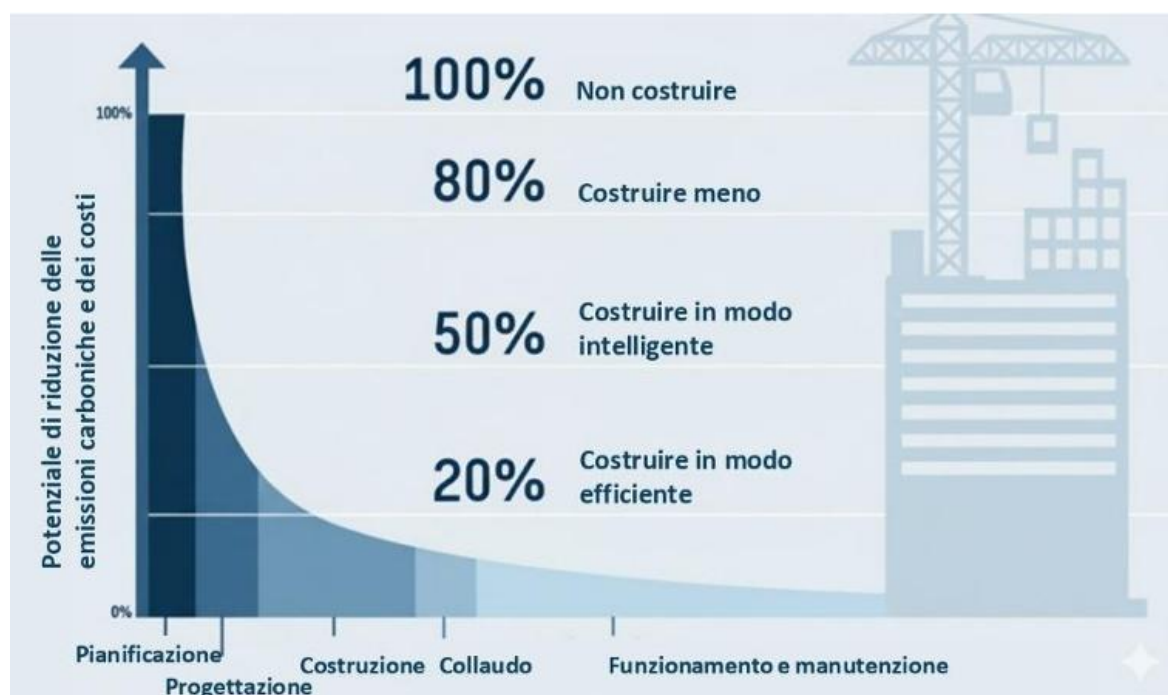


Figura 1.4: Approccio gerarchico "Build Nothing – Build Less – Build Clever – Build Efficiently"[15].

Tra i riferimenti internazionali, il report richiama anche il protocollo ENVISION, un sistema di valutazione della sostenibilità delle infrastrutture. Tra i suoi criteri è presente il credito "RA1.5 *Balance Earthwork On Site*", che assegna un punteggio ai progetti che limitano la movimentazione

delle terre fuori dal cantiere, in quanto riduce le emissioni dovute al trasporto dei materiali [15]. Questo criterio si collega direttamente al principio analizzato in questa tesi: mantenere il bilancio delle terre all'interno del sito riduce i chilometri percorsi dai mezzi e quindi le emissioni del cantiere.

1.3 La disciplina delle Terre e Rocce da Scavo

Una delle principali categorie di materiale che devono essere gestite in cantiere è le terre e rocce da scavo, che in fase di costruzione, soprattutto per progetti di grandi dimensioni rappresentano una voce rilevante sia in termini volumetrici che economici. La gestione, i costi e l'impatto ambientale di tale intervento sono condizionati dalla classificazione di tale materiale, che secondo il quadro normativo nazionale di riferimento, basato sul DPR 120/2017[16] permette di distinguere il materiale in rifiuto e sottoprodotto. Il decreto disciplina le condizioni per il riutilizzo delle terre da scavo come sottoprodotto.

1.3.1 DPR 120/2017 sottoprodotto vs rifiuto e i requisiti per il riutilizzo

Il DPR 120/2017[16] disciplina la gestione delle terre e rocce da scavo applicando le definizioni di sottoprodotto e rifiuto stabilite dall'art. 183 comma 1 lettera a) e 184-bis del D.Lgs. 152/2006[17]. L'art. 4 del DPR 120/2017[16], riporta che una terra da scavo è definita sottoprodotto se rispetta quattro requisiti:

- 1) il materiale è generato da un processo di scavo di realizzazione di un'opera;
- 2) l'utilizzo del materiale è conforme alle disposizioni del Piano di Utilizzo (PdU);
- 3) si possa riutilizzare direttamente senza particolari trattamenti industriali;
- 4) rispetta i requisiti chimici della Tab 4.1 del DPR stesso.

La Tabella 4.1 del decreto descrive il rispetto dei limiti chimici che è verificato attraverso un set analitico minimale, che include parametri quali metalli pesanti, idrocarburi, amianto e composti organici. Le terre da scavo idonee al riutilizzo possono essere impiegate in qualsiasi sito se la concentrazione di inquinanti rientra nei limiti della colonna A, oppure esclusivamente in siti a destinazione produttiva se i valori sono compresi tra le colonne A e B. Inoltre, il DPR 120/2017[16] in Allegato 2 definisce le procedure di campionamento in fase progettuale che per le infrastrutture lineari è previsto un campione ogni 500 m di tracciato, ridotto a uno ogni 2.000 m nel caso di PFTE. Tale densità ridotta, adeguata al livello preliminare del PFTE, dovrà essere

infittita nelle fasi progettuali successive per confermare la classificazione del materiale su tutto il tracciato

Per dimostrare che le terre da scavo siano classificabili come sottoprodotto e di conseguenza che rispettino i quattro requisiti sopra citati, il proponente deve redigere il Piano di Utilizzo, un documento che come scritto nell'Art.9[16], descrive i lavori di scavo, le caratteristiche chimiche del materiale, i siti di produzione indicando per ciascuna litologia i volumi in banco, siti di destinazione e relative distanze, la destinazione d'uso del materiale e le modalità di trasporto.

Le due classificazioni comportano modalità di gestione differenti. Se la terra da scavo rispetta i quattro requisiti dell'art. 4 ed è quindi classificata come sottoprodotto, può essere riutilizzata secondo il PdU, senza le autorizzazioni e i costi di smaltimento previsti per i rifiuti. Se invece non rispetta tali requisiti, il materiale è gestito come rifiuto secondo il D.Lgs. 152/2006[17] e deve essere conferito in impianti autorizzati. In questo caso, come descritto negli scenari del Capitolo 4, il materiale non rientra nel calcolo della quota di riutilizzo interno.

La redazione del PdU costituisce condizione necessaria per il riutilizzo del materiale scavato e risulta quindi direttamente collegata agli scenari di analisi sviluppati nel Capitolo 4.

2 I Criteri Ambientali Minimi (CAM) Strade

Come descritto nel precedente capitolo, il Green Public Procurement rappresenta lo strumento attraverso cui l'Unione Europea ha tradotto gli obiettivi di sostenibilità in obblighi concreti per le stazioni appaltanti. L'Italia ha tradotto concretamente quanto richiesto dall'Unione Europea attraverso l'introduzione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) che rappresentano lo strumento operativo che definisce i requisiti ambientali minimi da rispettare, resi obbligatori nei diversi settori di appalto pubblico. Il presente capitolo descrive l'evoluzione normativa dei CAM, i criteri specifici per i movimenti terra e gli strumenti di valutazione ambientale LCA ed EPD.

2.1 Evoluzione normativa

Sebbene i CAM siano stati resi obbligatori già con il D.Lgs. 50/2016[13], il primo decreto specifico per il settore edilizio è stato il DM 11/10/2017[18] e successivamente aggiornato con il DM 23/06/2022[19], creando però un vuoto normativo per gli altri settori tra cui quello infrastrutturale. Solamente con il DM 05/08/2024[20] sono stati introdotti i Criteri Ambientali Minimi specifici per il settore infrastrutturale con una successiva modifica e integrazione del DM 11/09/2025[21].

2.1.1 Dal CAM Edilizia (DM 11/10/2017 e DM 23/06/2022) al CAM Strade

Il primo decreto specifico per il settore edilizio venne introdotto attraverso il DM 11/10/2017[18] che obbligava le stazioni appaltanti ad applicare i Criteri Ambientali Minimi riducendo gli impatti ambientali per gli interventi di nuova costruzione, di ristrutturazione e per la manutenzione degli edifici pubblici, integrando il capitolato tecnico senza sostituirne i requisiti esistenti. La Pubblica Amministrazione doveva assicurarsi che in fase esecutiva i criteri e i principi di applicazione dei CAM fossero rispettati o eventualmente migliorati.

Il DM 23/06/2022[19] ha successivamente aggiornato e sostituito il decreto del 2017[18], mantenendo però il perimetro applicativo limitato al solo settore edilizio. Questo comportò un vuoto normativo per il settore stradale colmato solo con l'introduzione del DM 05/08/2024[20], primo decreto specifico per le infrastrutture stradali.

Tale decreto dedicato si è reso necessario per le specificità delle opere stradali rispetto a quelle edilizie, in quanto un'infrastruttura stradale è caratterizzata da un forte impatto dei movimenti terra e delle pavimentazioni, da una logistica di cantiere estesa sul territorio e da un ciclo di vita differente rispetto a quello di un edificio. Aspetti come la gestione delle terre da scavo, oggetto del presente lavoro, non trovavano una disciplina adeguata nei CAM Edilizia, concepiti per il sistema edificio.

2.1.2 DM 05/08/2024 e il decreto correttivo DM 11/09/2025: struttura, ambito di applicazione e aggiornamenti

Il DM 05/08/2024 CAM Strade[20], pubblicato in Gazzetta Ufficiale il 23 agosto 2024, è entrato in vigore il 21 dicembre 2024. Questo decreto concretizza il raggiungimento della sostenibilità previsto come obiettivo dall'Unione Europea di riduzione degli impatti ambientali e promozione dell'economia circolare. I CAM Strade rappresentano un insieme di criteri obbligatori fin dalla fase di progettazione, incluso il Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE), per interventi di nuova costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali, con ulteriori obblighi in fase esecutiva per l'appaltatore. Il decreto definisce una serie di indicazioni per le stazioni appaltanti e stabilisce i CAM come criteri necessari per decidere l'affidamento della progettazione e dell'esecuzione dei lavori. Inoltre, il progettista è obbligato a redigere una relazione CAM per descrivere tutti i criteri presenti nel decreto indicando per ciascun criterio le modalità di rispetto o, in caso di non applicabilità, fornendo adeguata motivazione. Il decreto si articola in criteri per l'affidamento del servizio di progettazione (Capitolo 2) e criteri per l'affidamento dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento (Capitolo 3), ciascuno comprendente clausole contrattuali, specifiche tecniche e criteri premianti. Il decreto include inoltre indicazioni specifiche per gli studi LCA (*Life Cycle Assessment*) e le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD, *Environmental Product Declaration*), strumenti di valutazione ambientale approfonditi nel paragrafo 2.3 del presente capitolo.

Il DM 11/09/2025[21] rappresenta il decreto correttivo dei CAM Strade pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 221 il 23 settembre 2025 ed è entrato in vigore il giorno successivo alla sua pubblicazione. Il decreto ha apportato modifiche e integrazioni al decreto originale, correggendo alcuni refusi e chiarendo l'applicazione di diversi criteri. Tra le modifiche più rilevanti figura la soppressione della possibilità per il progettista di derogare autonomamente ai criteri, sia per contrasto con normative tecniche di settore sia per particolari condizioni del sito, rendendo i CAM pienamente obbligatori in qualsiasi condizione di progetto. Inoltre, il decreto ha chiarito

che l'integrazione dei requisiti ambientali deve avvenire già a partire dal Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE), livello progettuale a cui si colloca il presente caso studio.

2.2 I criteri ambientali per i movimenti terra

Nel presente paragrafo vengono descritti i Criteri Ambientali Minimi relativi al riutilizzo del materiale da scavo rispettando le soglie minime previste dal DM 05/08/2024[20] e alla classificazione dei siti di gestione previsti.

2.2.1 Riutilizzo delle terre da scavo: soglie minime e siti di gestione

Nello specifico, uno dei criteri previsti nel DM 05/08/2024[20] è il 2.3.1 “Circolarità dei prodotti da costruzione” in cui viene previsto nella progettazione di nuovi progetti l'utilizzo in percentuale di almeno il 70% in termini di peso secco su secco del prodotto finito, dei materiali da costruzione recuperati, riciclati o sottoprodotti che siano in grado di garantire le stesse prestazioni dei materiali vergini. Mentre nel caso di strade già esistenti viene ulteriormente richiesto se possibile, il riutilizzo del materiale del corpo stradale stesso. Inoltre, viene richiesto nella Relazione CAM al progettista in che modo è stato raggiunto tale obiettivo del criterio.

Nel caso studio in esame ci si è focalizzati esclusivamente sul corpo del rilevato, sono riportate nella Figura 2.1 le percentuali minime previste dal decreto.

<u>Corpo stradale</u>	
Bonifica del piano di posa del rilevato	$\geq 70\%$
Corpo del rilevato	$\geq 70\%$
Sottofondo	$\geq 70\%$

Figura 2.1: Percentuali minime di materiale recuperato, riciclato o sottoprodotto per il corpo stradale[20].

Inoltre, il sottoparagrafo 1.3.1 del DM 05/08/2024[20] prevede che vengano individuati i siti per il reperimento del materiale e gli impianti di gestione dei rifiuti, descritti nel Capitolo 3.

Nonostante non siano stati analizzati nel caso in esame è utile essere a conoscenza che per i rinterri degli scavi delle opere d'arte (fondazioni, tombini, sottoservizi) il decreto prevede il riutilizzo del materiale di scavo proveniente dallo stesso cantiere o da altri cantieri, oppure materiale riciclato conforme alla norma UNI 11531-1 (paragrafo 2.4.4 DM 05/08/2024[20]).

2.3 Strumenti di valutazione ambientale: LCA e EPD

In questo paragrafo vengono trattati gli strumenti di valutazione ambientale LCA e EPD che consentono di valutare e dimostrare la sostenibilità ambientale dell'opera. I due strumenti sono strettamente correlati: l'LCA fornisce la metodologia di calcolo degli impatti ambientali durante l'intero ciclo di vita, mentre l'EPD ne rappresenta lo strumento di comunicazione e certificazione, rendendo i risultati verificabili e confrontabili tra prodotti diversi. Entrambi sono richiesti dai CAM Strade di cui al DM 05/08/2024 [20] come elementi fondamentali per dimostrare la conformità ai criteri ambientali minimi nelle infrastrutture stradali.

2.3.1 Life Cycle Assessment (LCA)

Il *Life Cycle Assessment* (LCA) rappresenta secondo il paragrafo 1.3.2 del DM 05/08/2024[20] uno strumento di valutazione dell'impatto ambientale di un'opera durante tutto il ciclo di vita dalla produzione dei materiali fino alla sua demolizione. Il D.Lgs. 36/2023[10] prevede già in fase di PFTE gli studi LCA condotti secondo le norme UNI EN 15643[22], UNI EN 17472[23] e UNI EN 15804[24] che devono essere allegati alla Relazione di Sostenibilità. Secondo il DM è possibile effettuare un'analisi LCA utilizzando un metodo semplificato considerando solo le fasi di produzione (A1-A3), trasporto e costruzione (A4-A5) e fine vita (C1-C4) in cui si devono considerare almeno tre indicatori ambientali, di cui deve essere obbligatoriamente la CO₂ equivalente (GWP, *Global Warming Potential*).

Le fasi A1-A3 comprendono l'estrazione delle materie prime, il trasporto ai siti di produzione e la produzione dei materiali da costruzione. Le fasi A4-A5 riguardano il trasporto dei materiali in cantiere e le operazioni di costruzione, incluso il movimento delle terre da scavo. Le fasi C1-C4 includono la demolizione, il trasporto dei rifiuti e il loro smaltimento o recupero a fine vita dell'opera.

Tra gli indicatori facoltativi rientrano l'ODP (*Ozone Depletion Potential*), l'AP (*Acidification Potential*) e l'EP (*Eutrophication Potential*). La scelta di almeno tre indicatori consente di avere una visione più completa degli impatti ambientali dell'opera, andando oltre la sola valutazione delle emissioni climalteranti.

Nella Figura 2.2 vengono riportate, evidenziate in grigio, le fasi da considerare nello studio LCA semplificato.

Moduli informativi per la valutazione delle prestazioni ambientali, sociali ed economiche della costruzione (rif. UNI EN 17472:2022)						Fasi LCA semplificata: - Fase di produzione (tutte) - Fase di costruzione (tutte) - Fase di fine vita (tutte)								
FASE DI PRE-COSTRUZIONE	FASE DI PRODUZIONE			FASE DI COSTRUZIONE		FASE DI UTILIZZO					FASE DI FINE VITA			
STUDI PRELIMINARI, PROVE, ACQUISIZIONE TERRENO/SITO E PROGETTAZIONE	FORNITURA DEI MATERIALI	TRASPORTO	PRODUZIONE	TRASPORTO	COSTRUZIONE	B1	B2	B3	B4	B5	DEMOLIZIONE	TRASPORTO	TRASFORMAZIONE DEI RIFIUTI PER IL RIUTILIZZO, IL RICICLAGGIO E IL RECUPERO ENERGETICO	
						UTILIZZO	MANUTENZIONE	RIPARAZIONE	SOSTITUZIONE	RIFACIMENTO				
						B6 CONSUMO ENERGETICO IN FASE DI FUNZIONAMENTO								
						B7 CONSUMO IDRICO IN FASE DI FUNZIONAMENTO								
						B8 UTILIZZO DA PARTE DELL'UTENTE								
A0	A1	A2	A3	A4	A5						C1	C2	C3	C4

Figura 2.2: Fasi da comprendere nell'analisi LCA[20].

Inoltre, proprio per l'importanza dello studio LCA, lo stesso Decreto [20] prevede, secondo il criterio 3.2.2, un punteggio premiante per l'operatore economico che presenta proposte migliorative basate su studi LCA, dimostrando un miglioramento degli indicatori ambientali rispetto al progetto a base di gara.

Si precisa che nel caso studio il confronto tra scenari descritti nel paragrafo 4.3 è avvenuto mediante $\text{veh} \cdot \text{km}$ e stima delle emissioni di CO_2 da trasporto che rappresenta un approccio coerente con il livello di PFTE e con il regime contrattuale D.Lgs. 50/2016[13] sotto cui il progetto è stato affidato.

2.3.2 Environmental Product Declaration (EPD)

L'EPD (*Environmental Product Declaration*) che in italiano viene tradotta in Dichiarazione Ambientale di Prodotto (DAP) rappresenta uno strumento volontario, basato su uno studio LCA, di certificazione di impatto ambientale dei prodotti durante tutto il loro ciclo di vita. Inoltre, la norma ISO 14025[25] inquadra l'EPD come un'etichettatura ambientale di Tipo III, dato che l'EPD descrive in maniera oggettiva, con dati scientifici e comparabili le prestazioni ambientali del prodotto stesso con regole metodologiche predefinite. Gli impatti ambientali

vengono stimati esponendo diverse categorie di inquinanti, tra cui il potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential*, GWP), potenziale di acidificazione (*Acidification Potential*, AP), deplezione ozono stratosferico (*Ozone Depletion Potential*, ODP),... L'EPD rappresenta una certificazione che consente alle aziende produttrici di materiale di essere competitive e appetibili sul mercato, perché è una qualificazione a livello internazionale, in quanto è validato da un organismo di certificazione terzo. Le EPD, oltre a fornire indicatori ambientali quantitativi, costituiscono anche una fonte di dati utile per stimare le percentuali di materiale avviabile a riciclo o recupero, come previsto dal criterio 2.4.2 del DM 05/08/2024[20]. Il DM 05/08/2024[20] consente di allegare le dichiarazioni EPD ancora valide, solitamente i certificati hanno una validità di cinque anni, unitamente allo studio LCA, aggiungendo valore al progetto. Durante la fase esecutiva è possibile sostituire un materiale previsto in progetto nelle fasi precedenti senza certificazione con un materiale avente la EPD, in quanto viene previsto un miglioramento sull'impatto ambientale.

Coerentemente con quanto specificato nel paragrafo precedente, nel caso studio non sono state reperite EPD per il materiale da scavo classificato come sottoprodotto ai sensi del DPR 120/2017[16].

3 Il Progetto pilota

In questo capitolo si descrive il progetto pilota utilizzato come caso studio per l'applicazione dei CAM Strade. L'intervento oggetto del caso studio è il Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE) per la realizzazione della Tangenziale Sud Ovest di Asti, inserito nel Tronco 2 dell'asse autostradale A21 Torino–Piacenza e affidato al concessionario Ivrea Torino Piacenza (ITP) S.p.A.

La progettazione è stata affidata a Masera Engineering Group S.r.l., i cui elaborati costituiscono la fonte primaria del presente capitolo. Quest'ultimo è delineato in tre parti: nella prima viene descritto l'intervento e il suo inquadramento territoriale e infrastrutturale, nella seconda vengono evidenziate le opere di progetto, nell'ultima parte la cantierizzazione e i siti di gestione.

3.1 Descrizione dell'intervento

Questa sezione descrive l'intervento oggetto del caso studio. Nel primo sottoparagrafo viene illustrato l'inquadramento territoriale e infrastrutturale del tracciato, con le principali caratteristiche geometriche e le opere previste. Nel secondo viene analizzato il livello progettuale adottato — il PFTE — e il contesto normativo relativo all'applicazione dei CAM Strade.

3.1.1 Inquadramento territoriale e infrastrutturale

L'intervento si colloca nel territorio comunale di Asti, in Piemonte e prevede la realizzazione del nuovo tracciato avente una sezione di Categoria C1 extraurbana secondaria secondo il D.M. 05/11/2001[26] con velocità di progetto compresa tra 60 e 100 km/h, che ha inizio in prossimità del km 5+700 della SS231 e da qui prosegue verso ovest per poi attraversare quasi in ortogonale il fiume Tanaro, a sud del Golf Club Asti. Effettuata l'intersezione in rotatoria con la SP8, il tracciato si inserisce mediante galleria naturale nelle colline tra Borbore e Tanaro per poi uscire lato nord e dirigersi, dopo aver risolto l'intersezione in viadotto con la Viale Bianco Don Alfredo e la linea ferroviaria Torino-Asti, verso la SR10 dove avviene l'intersezione sulla rotatoria esistente. L'asse principale ha uno sviluppo complessivo di circa 4.930 m, suddivisi in 2.100 m su viadotto, 1.494 m in galleria naturale, 96 m di galleria artificiale e 1.305 m in rilevato e trincea.

Il tracciato del progetto è rappresentato in Figura 3.1.



Figura 3.1: Corografia di inquadramento della Tangenziale Sud Ovest di Asti[27].

3.1.2 Il PFTE: contenuti e applicazione dei CAM

Il Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica, che costituisce la soluzione progettualmente migliore tra le alternative analizzate in termini di rapporto costi-benefici per la collettività (descritti nel paragrafo successivo), è stato redatto da Masera Engineering Group S.r.l, secondo il vecchio Codice (D.Lgs. 50/2016[13]) in cui si prevedevano tre livelli di progettazione: il PFTE che ha sostituito la dicitura di progetto preliminare del Codice del D.Lgs. 163/2006[28] precedente, il definitivo e l'esecutivo. Invece, il nuovo Codice[10], attualmente in vigore, prevede solo due livelli, dato che il PFTE ha ottenuto una importanza maggiore inglobando il progetto definitivo.

Il nuovo Codice di Contratti, il D.Lgs. 36/2023[10] obbliga l'applicabilità dei CAM sui rispettivi progetti, ma al caso in esame è stato applicato un contratto che fa riferimento al D.Lgs. 50/2016[13], in cui il PFTE è stato affidato sotto il vecchio Codice di Contratti, quindi l'applicazione dei CAM Strade è un'analisi aggiuntiva condotta a posteriori, non un obbligo contrattuale, in quanto non esisteva ancora.

Il PFTE è composto da elaborati generali di inquadramento dell'intervento, studi specialistici (geologici, idrologici, ambientali, acustici, archeologici e sismici), progetto stradale con opere d'arte maggiori e minori, piano di cantierizzazione con individuazione dei siti di gestione del materiale e documentazione economica, tutti redatti con riferimento al 31 ottobre 2025[29].

L'elenco elaborati del PFTE, i profili longitudinali altimetrici e le sezioni tipo del corpo stradale sono riportati in Appendice A (Figure A.1-A.7).

3.1.3 Analisi delle alternative progettuali

Secondo la relazione illustrativa e tecnica del PFTE[27], le alternative progettuali analizzate sono tre, si riportano di seguito le caratteristiche e problematiche riscontrate per ciascuna:

- L'alternativa verde ha uno sviluppo d'asse principale di 5.250 m e attraversa trasversalmente il fiume Tanaro con campate atipiche di lunghezza superiore a 300 m. Presenta inoltre un impatto paesaggistico rilevante in prossimità del centro urbano di Asti, interferenza con il Golf Club e un'intersezione con la SP8 molto impattante che prevede la demolizione di alcuni fabbricati e l'esproprio di alcune aree.
- L'alternativa rossa tratteggiata, corrispondente al tracciato selezionato, ha lo stesso punto di partenza e di arrivo dell'alternativa verde con uno sviluppo dell'asse principale di 4.930 m. Si prevede l'attraversamento del Tanaro in modo quasi ortogonale, rappresentando un'ottimizzazione delle campate del viadotto. Inoltre si prevede l'inserimento di una galleria naturale nelle colline tra Borbore e Tanaro, una maggiore distanza dalle zone di pregio naturalistico (stagni di Belangero e oasi WWF) rispetto all'alternativa precedente e un minor impatto paesaggistico grazie all'arretramento dell'opera rispetto al centro di Asti e a un'intersezione con la SP8 meno invasiva.
- L'alternativa viola evita completamente l'area SIC (Sito di Importanza Comunitaria) degli Stagni di Belangero. Il punto di partenza è diverso rispetto alle alternative precedenti, in quanto origina al km 64+200 della A33 integrandosi con lo svincolo Isola d'Alba, supera in viadotto l'area di esondazione del Tanaro con attraversamento ortogonale e riduce quasi a zero l'impatto paesaggistico rispetto al centro di Asti. Nonostante questi vantaggi, presenta criticità rilevanti: si posiziona sul perimetro dell'Oasi del Tanaro vincolata ai sensi del D.Lgs. 42/2004[30] e le due rotatorie ravvicinate previste riducono la funzionalità tangenziale dell'opera.

Sulla base di quanto appena descritto risulta evidente che la scelta dell'alternativa rossa sia la migliore in quanto presenta un minor impatto paesaggistico e ambientale evitando le principali interferenze con corsi d'acqua e aree protette, garantendo inoltre la funzionalità tangenziale dell'opera.

Le alternative progettuali sono rappresentate nella Figura 3.2.

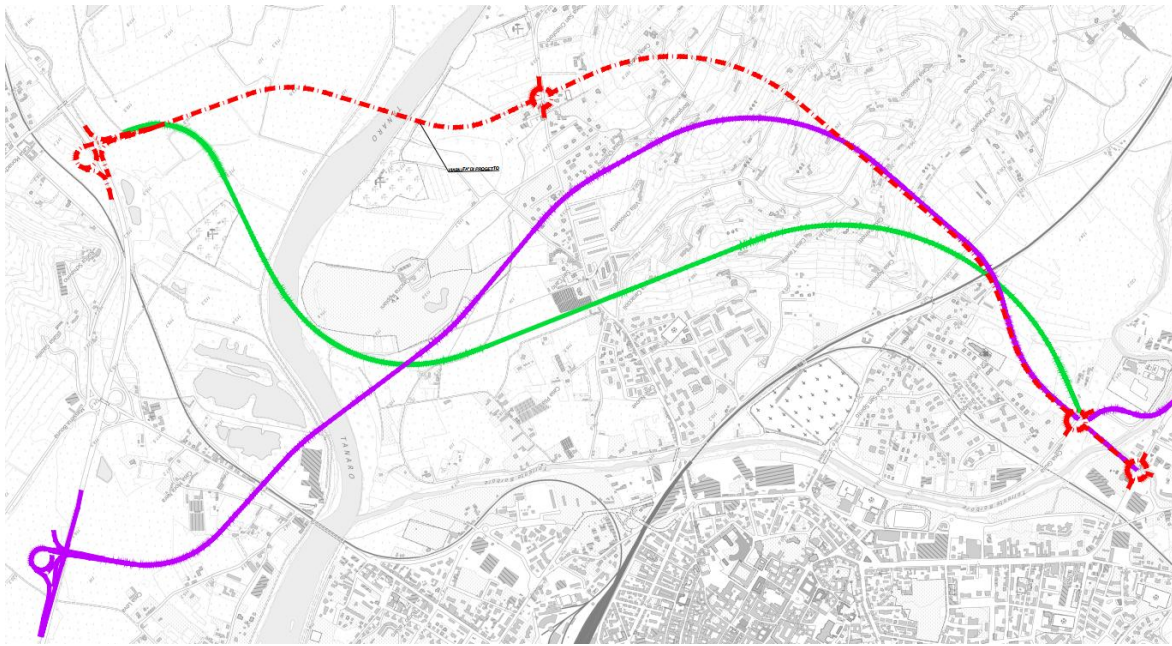


Figura 3.2: Tracciato stradale - Alternative progettuali[31].

3.2 Le opere di progetto

In questo paragrafo vengono descritte le principali opere previste dal progetto, sulla base degli elaborati del PFTE redatti da Masera Engineering Group S.r.l., e la motivazione per cui si è scelto di focalizzarsi sui rilevati nell'ambito dell'applicazione dei CAM Strade.

3.2.1 Le opere d'arte maggiori

Il progetto, oltre ai tratti nei quali sono previsti scavi e rilevati inerenti al corpo stradale, prevede anche la realizzazione di opere d'arte maggiori, strutture che consentono alla piattaforma stradale di superare ostacoli naturali o artificiali di particolare entità, garantendo la continuità del tracciato. Nel caso specifico, sono previste cinque opere d'arte maggiori:

- Il Cavalcavia di scavalco dell'autostrada A33 è un'opera a singola campata di 48 m in sezione mista acciaio-calcestruzzo, realizzata per garantire la continuità del tracciato in corrispondenza dell'autostrada esistente.
- Il ponte sul fiume Tanaro è un'opera con sviluppo totale di 1510 m ed è composta da tre impalcati a sezione mista acciaio-calcestruzzo e un impalcato a cassone in c.a.p. (cemento armato precompresso) per un totale di 31 campate.
- Il Calvalferrovia Torino-Asti RFI è un viadotto di 428 m a sezione mista acciaio-calcestruzzo articolato in 10 campate.

- Il ponte sul Rio Borbore presenta una sezione mista in acciaio-calcestruzzo suddiviso in 4 campate per uno sviluppo complessivo pari a 160 m.
- La galleria si sviluppa per 1.590 m complessivi suddivisa in 1.494 m di galleria naturale ed 96 m di galleria artificiale agli imbocchi ed è localizzata nelle colline tra il Rio Borbore e il fiume Tanaro.

3.2.2 Focus sui rilevati: motivazione della scelta metodologica

L'analisi descritta nel Capitolo 4, tiene conto dei volumi del corpo stradale (sterro e riporto) escludendo quelli derivanti da opere in sotterraneo, ovvero gallerie artificiali, galleria naturale ed imbocchi, in quanto presentano processi costruttivi non confrontabili con il metodo classico del bilancio delle terre. Sono anche esclusi dalla valutazione del bilancio terre i viadotti, in quanto non rappresentano in termini quantitativi una voce significativa per la stima. Come descritto nel paragrafo 3.1.1, lo sviluppo in rilevato e trincea corrisponde a 1.305 m, ovvero lo sterro da gestire e il riporto da approvvigionare. I tratti in rilevato e trincea rappresentano l'unica componente del tracciato a cui si applica il criterio 2.3.1 del DM 05/08/2024[20] sul riutilizzo del materiale da scavo, che richiede una percentuale minima del 70% di materiale recuperato nel corpo del rilevato.

3.3 Piano di cantierizzazione e siti di gestione

Nel primo sottoparagrafo viene descritta l'organizzazione delle aree di cantiere del caso studio, mentre nel secondo si individuano geograficamente i siti e le loro distanze. I dati che verranno riportati sono importanti in quanto le distanze dai siti sono utilizzate negli scenari del Capitolo 4 per il calcolo dei veh·km che rappresenta un parametro fondamentale per l'analisi.

3.3.1 Organizzazione delle aree di cantiere

Il piano di cantierizzazione prevede quattro aree operative distribuite lungo il tracciato:

- Zona A (8.800 mq): campo base, uffici e servizi per il personale;
- Zona B (29.200 mq): deposito principale dei materiali per rilevati e sottofondi;
- Zona C (29.300 mq): zona operativa per le grandi lavorazioni, con impianto di betonaggio;

- Zona D (15.100 mq): deposito temporaneo dei materiali di scavo e stoccaggio materiali secondari.

La distribuzione delle zone lungo i circa 5 km di tracciato riflette la sequenza logica delle lavorazioni, minimizzando i percorsi interni tra le aree di scavo e quelle di riporto.

Sono rappresentate in Figura 3.3 le aree di cantiere del progetto.

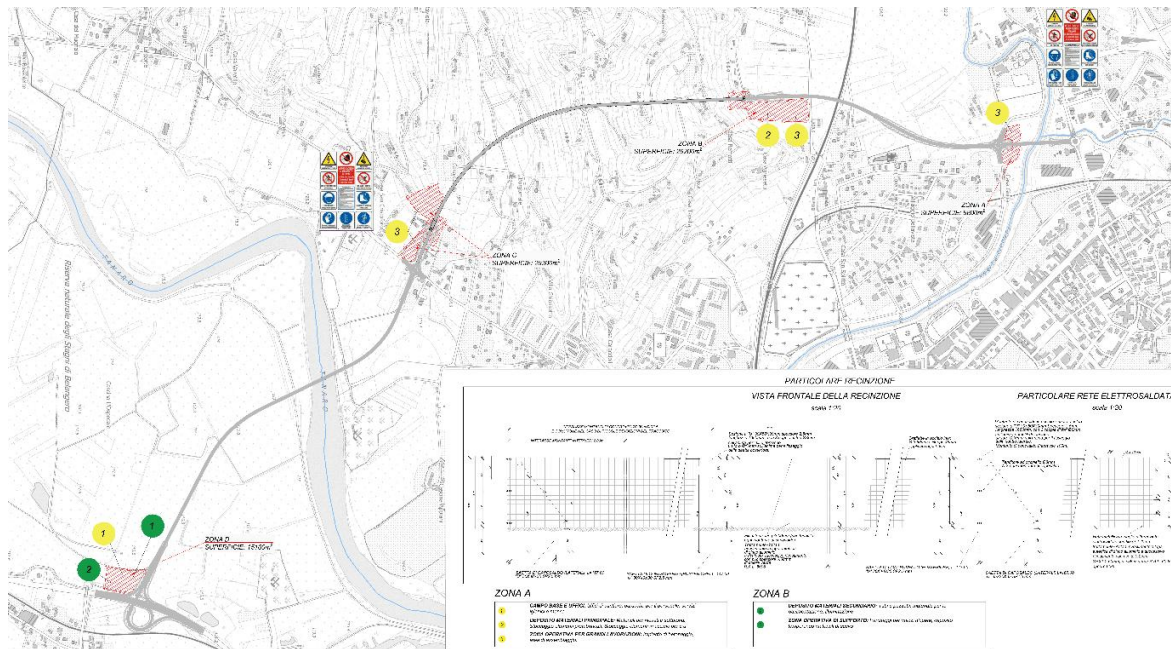


Figura 3.3: Planimetria delle aree di cantiere[32].

3.3.2 Siti di gestione del materiale: localizzazione e distanze

Gli elaborati di cantierizzazione individuano tre siti esterni per la gestione del materiale che, per ragioni di riservatezza commerciale, non vengono nominati esplicitamente nel presente lavoro[33]. Come viene precisato negli stessi elaborati, le distanze sono stimate su valori generici da mappe stradali principali, considerando il percorso più esteso e senza tenere pienamente conto delle restrizioni previste per i mezzi pesanti; esse costituiscono pertanto un riferimento approssimativo per le analisi di cui al Capitolo 4.

Il sito più vicino al cantiere è quello di conferimento, posto a 16,3 km, inteso come impianto specializzato di trattamento presso cui è possibile sia conferire il materiale in eccesso sia approvvigionare materiale trattato. A maggiore distanza si trovano la cava di prestito, a 23,4 km, utilizzata come fonte di approvvigionamento del materiale per i riporti in deficit, e il sito di discarica, a 34,8 km, destinato allo smaltimento definitivo del materiale non riutilizzabile.

Queste distanze costituiscono i parametri di riferimento per il calcolo dei trasporti nelle analisi di cui al Capitolo 4.

4 Bilancio delle terre: metodologia e risultati

L'obiettivo del capitolo è definire la metodologia applicata e analizzare i risultati ottenuti. Nella prima parte vengono descritti i parametri geotecnici applicati, nella seconda vengono confrontati i risultati dei differenti scenari in termini di veicoli·chilometro (veh·km) complessivi, di pianificazione e di emissione inquinanti di CO₂ considerando due diverse tipologie di mezzo di trasporto del materiale.

4.1 Metodologia e analisi

L'analisi si focalizza sull'utilizzo del software Civil3D che permette di estrarre volumi di sterro e di riporto della zona di interesse, convertiti successivamente attraverso dei coefficienti litologici presenti in letteratura. Il confronto degli scenari in termini di impatti logistici e ambientali è avvenuto attraverso il parametro veh·km.

4.1.1 Civil3D CutFillReport e coefficienti volumetrici (ϵ e ϵ')

Nella progettazione stradale civile e nella gestione dei cantieri, il bilancio terre quantifica i volumi di terreno di scavo (sterro) e di riempimento (riporto). Questo consente di capire, fin dalle prime fasi di progettazione, l'autosufficienza del cantiere, delineando tre possibili condizioni operative:

1. Pareggio: rappresenta lo scenario migliore, il volume di sterro e di riporto si equivalgono comportando solo movimentazioni interne al cantiere;
2. Esubero: il volume di sterro è superiore a quello necessario per il rinterro, in questo caso il terreno in eccesso dovrà essere smaltito in discarica o riutilizzato in altri siti;
3. Deficit: il volume di sterro è inferiore a quello necessario a coprire l'autosufficienza del cantiere, questo comporta un rifornimento esterno del materiale vergine o riciclato idoneo da cave di prestito o siti di conferimento.

Nel caso in esame, il bilancio delle terre è stato determinato con l'utilizzo di Autodesk Civil3D, un software di progettazione stradale basato sulla tecnologia BIM (Building Information Modeling) che ha permesso di estrarre un Report denominato CutFillReport restituendo un deficit minimo pari a 2.420,91 mc di materiale sciolto.

Per ottenere tale risultato il punto di partenza è stato quello di utilizzare come riferimento l'elaborato geologico redatto per il caso studio, escludendo, come già scritto all'inizio del

capitolo, la tratta in sotterraneo. In questo modo è stato possibile distinguere tre differenti depositi attraversati: il complesso limoso - argilloso, il complesso limoso - sabbioso e il complesso ghiaioso – sabbioso.

Le litologie attraversate dal tracciato sono visibili nella carta geologico-geomorfologica riportata in Appendice A (Figura A.8) [34].

Per ciascuna tipologia litologica estratta da CutFillReport è stato inizialmente applicato un coefficiente di conversione pari all'unità che rappresentano i valori volumetrici grezzi, per lo sterro corrisponde al volume di banco del materiale nel suo stato naturale, mentre per il rilevato il volume geometrico nello stato compattato finale di progetto.

Per questo motivo, per il successivo confronto di volumi di materiale trasportato è stato necessario trasformare sia il volume di sterro che di riporto in volume sciolto, applicando le seguenti formule:

$$V_{sterro\ (sciolto)} = V_{sterro\ (banco)} \cdot \epsilon$$

$$V_{riporto\ (sciolto)} = V_{riporto\ (compattato)} \cdot \epsilon'$$

Dove:

ϵ è il coefficiente di rigonfiamento;

ϵ' è il coefficiente di costipamento (o rigonfiamento residuo dopo la compattazione).

Per ottenere il bilancio netto pari a 2.420,91 mc, partendo dalla Tabella 4.1 presente in letteratura[35], in base alle litologie presenti nel tracciato, sono stati individuati i coefficienti di rigonfiamento e di compattazione. I terreni limoso-sabbioso e ghiaioso-sabbioso sono stati considerati come “Terreno sabbioso”, in quanto la sabbia rappresenta l'aggregato predominante, mentre per il terreno limoso-argilloso come “Terreno vegetale forte”, in quanto la componente limosa rende meno rigido il terreno rispetto a un terreno argilloso compattato che conseguentemente implica una diminuzione del rigonfiamento.

Tabella 4.1: Coefficienti volumetrici di rigonfiamento totale (ϵ) e residuo (ϵ') delle terre per trasporti e rilevati [35].

Tipi di terreno	ϵ [-]	ϵ' [-]	ϵ' [%]
Terreno sabbioso	1,05	1,04	4%
Terreno vegetale sciolto	1,10	1,05	5%
Terreno vegetale forte	1,20	1,10	10%
Terreno argilloso compatto	1,25 ÷ 1,40	1,15	15%
Terreno argilloso molto compattato	1,70	1,40	40%
Rocce poco compatte	1,30 ÷ 1,50	1,20	20%
Rocce dure	1,40 ÷ 1,60	1,40	40%

In accordo con il relatore e in assenza di una caratterizzazione geotecnica puntuale, non disponibile in fase di PFTE, è stato adottato un coefficiente di rigonfiamento unico $\epsilon = 1,10$ e un coefficiente di costipamento unico $\epsilon' = 1,05$, applicati a tutte le litologie del tracciato come valori preliminari cautelativi. Tali valori dovranno essere verificati e aggiornati nelle fasi progettuali successive a seguito di indagini geotecniche specifiche.

4.1.2 Il parametro di confronto: veicoli·chilometro (veh·km)

La scelta del parametro utilizzato per l'analisi del bilancio terre ha come basi il parametro standard applicato nel trasporto pubblico, ovvero il passeggero·chilometro, che consente di misurare il volume di servizio offerto (lavoro di trasporto) e confrontare diversi scenari in base al numero di passeggeri e chilometri percorsi. Nel caso in esame, seguendo la stessa analogia è stato scelto il parametro veicolo·chilometro in cui vengono misurati quanti camion percorrono un certo numero specifico di chilometri per trasportare il terreno verso differenti siti e con caratteristiche logistiche molto diverse, per questo è possibile definirlo come un parametro sintetico. La combinazione dei numeri di viaggi e della distanza è necessaria, in quanto, presi singolarmente perderebbero il significato e le informazioni. Considerando indipendentemente il parametro numero di viaggi, non terrebbe conto nell'analisi dei chilometri necessari per raggiungere la destinazione, nello stesso modo considerando solo la distanza, non terrebbe conto di quanti viaggi sono necessari per trasportare tutto il materiale sciolto previsto nel caso studio. Per poter procedere nell'analisi progettuale è essenziale aver a disposizione tre dati di input: i volumi di materiale sciolto da trasportare, le distanze da percorrere per raggiungere i siti disponibili e la capacità dei mezzi. Nel progetto pilota, per descrivere la variazione dei risultati,

sono state considerate due tipologie di mezzi: un autocarro con capacità di 10 mc e un autoarticolato con capacità di 20 mc. Tali capacità sono state scelte in coerenza con i limiti di massa stabiliti dall'Art. 62 del D.Lgs. 285/1992 (Codice della Strada) nei commi 3 e 4[36]. Considerando un peso specifico del terreno argilloso pari a circa 1,8 t/mc, un autocarro da 10 mc raggiunge una massa di circa 18 t, corrispondente al limite previsto per veicoli isolati a due assi, mentre un autoarticolato da 20 mc raggiunge circa 36 t, entro il limite di 40 t previsto per autoarticolati a quattro assi. Il numero di viaggi è stato stimato dividendo il volume di materiale sciolto per la capacità del mezzo arrotondando per eccesso, in quanto non è possibile effettuare un viaggio parziale, in quanto un viaggio tiene in considerazione andata e ritorno del mezzo.

$$N_{viaggi} = \left\lceil \frac{V_{sciolto}}{C_{mezzo}} \right\rceil$$

Dove:

- $V_{sciolto}$ = volume di materiale sciolto [mc]
- C_{mezzo} = capacità del mezzo di trasporto [mc]

La distanza tiene conto sia dell'andata che del ritorno, poiché il mezzo, partendo dal cantiere e spostandosi al sito, dovrà tornare nel luogo di origine dello spostamento, indipendentemente dal carico.

A questo punto è stato possibile determinare i veh·km attraverso la seguente formula:

$$veh \cdot km = N_{viaggi} \cdot d_{A/R}$$

Dove:

- N_{viaggi} = numero di viaggi per il trasporto del materiale [veh]
- $d_{A/R}$ = distanza andata e ritorno [km]

4.2 Dati di base – Volumi del corpo stradale

I seguenti paragrafi presentano i volumi di sterro e riporto estratti dal modello Civil3D per le tre litologie del corpo stradale e la successiva conversione volumetrica allo stato sciolto mediante i coefficienti e e e' .

4.2.1 Risultati del CutFillReport per litologia

I volumi di sterro e riporto del corpo stradale, estratti dal CutFillReport di Autodesk Civil3D con fattori di conversione impostati a 1,0, sono riportati nella Tabella 4.2.

Tabella 4.2: Volumi di sterro (stato banco) e riporto (stato compattato di progetto) estratti dal CutFillReport

Litologia	Sterro banco (mc)	Riporto compattato (mc)
Complesso limoso-argilloso	23.035,14	981,60
Complesso limoso-sabbioso	46.695,44	51.733,91
Complesso ghiaioso-sabbioso	632,14	23.303,44
Totale	70.362,72	76.018,95

4.2.2 Conversione volumetrica e saldo finale

Applicando tale metodologia, con l'utilizzo di Excel è stato possibile ricavare i risultati descritti nella Tabella 4.3 e ottenendo un deficit di sterro sciolto di 2.420,91 mc, rientrando nella terza casistica descritta nel paragrafo 4.1.1.

Tabella 4.3: Conversione volumetrica sterro e riporto con coefficienti ϵ e ϵ' .

Litologia	ϵ [-]	Sterro sciolto (mc)	ϵ' [-]	Riporto sciolto (mc)
Complesso limoso-argilloso	1,10	25.338,65	1,05	1.030,68
Complesso limoso-sabbioso	1,10	51.364,98	1,05	54.320,61
Complesso ghiaioso-sabbioso	1,10	695,35	1,05	24.468,61
Totale	—	77.398,99	—	79.819,90
Saldo sciolto netto	—	-2.420,91 (deficit)	—	—

4.3 Definizione degli scenari di confronto

Per la valutazione dell'impatto ambientale della gestione delle terre da scavo sono stati individuati i cinque scenari più rilevanti con scelte operative differenti.

Gli scenari vengono diversificati in base alla percentuale di materiale da scavo riutilizzato internamente, dove la quota di sterro non riutilizzata viene smaltita nel sito di discarica, mentre

il deficit di riporto viene compensato con materiale vergine proveniente dalla cava di prestito o con materiale riciclato proveniente dal sito di conferimento.

Lo scenario A rappresenta il caso limite peggiore, in quanto non prevede il riutilizzo del materiale internamente al cantiere, lo scenario B il massimo riutilizzo possibile quindi il caso migliore, mentre lo scenario C prevede la soglia minima di conformità CAM, garantendo il 70% di materiale recuperato sul volume di riporto necessario. Gli scenari D ed E, invece rappresentano delle soluzioni intermedie.

Si riportano di seguito, in Tabella 4.4 e 4.5, i valori relativi alla gestione del materiale scavato e di riporto per ciascuno scenario.

Tabella 4.4: Destinazione del materiale scavato per scenario (mc sciolto)

Scenario	Riutilizzo interno (mc)	Conferimento (mc)	Discarica (mc)	Totale (mc)
Scenario A (Peggior)	0,00	0,00	77.398,99	77.398,99
Scenario B (Ottimale)	77.398,99	0,00	0,00	77.398,99
Scenario C (Min. CAM)	55.873,93	0,00	21.525,06	77.398,99
Scenario D (Intermedio 1)	0,00	0,00	77.398,99	77.398,99
Scenario E (Intermedio 2)	38.699,50	0,00	38.699,49	77.398,99

Tabella 4.5: Provenienza del materiale di riporto per scenario (mc sciolto)

Scenario	Riutilizzo interno (mc)	Cava di prestito (mc)	Conferimento (mc)	Totale (mc)
Scenario A (Peggior)	0,00	79.819,90	0,00	79.819,90
Scenario B (Ottimale)	77.398,99	0,00	0,00	79.819,90
Scenario C (Min. CAM)	55.873,93	23.945,97	0,00	79.819,90
Scenario D (Intermedio 1)	0,00	23.945,97	55.873,93	79.819,90
Scenario E (Intermedio 2)	38.699,50	23.945,97	17.174,43	79.819,90

Una rappresentazione grafica dei dati è disponibile in Appendice B (Figure B.1 e B.2).

La verifica della conformità agli scenari CAM è stata condotta in termini volumetrici sul materiale sciolto, in quanto coerente con il livello di approfondimento del PFTE e con i dati estratti da Civil 3D. Tale approccio, pur differendo dalla verifica ponderale in peso secco prevista dal DM 05/08/2024[20], consente un confronto omogeneo tra gli scenari in termini di veh·km e CO₂, rimandando la verifica formale alle fasi progettuali successive.

4.3.1 Scenario A – Caso limite: nessun riutilizzo

Lo Scenario A prevede operativamente che tutto il materiale da scavo sia conferito al sito di discarica posto a 34,8 km dal cantiere, mentre il materiale per i riporti viene approvvigionato dalla cava di prestito a 23,4 km. Non prevedendo alcun riutilizzo interno, quindi non rispettando il limite minimo pari al 70% dei CAM Strade è la soluzione peggiore in termini di impatto ambientale, che sarà descritto nei risultati che seguiranno.

4.3.2 Scenario B – Caso ottimale: massimo riutilizzo in sito

Lo scenario B rappresenta il caso ottimale, in quanto tutto il materiale scavato viene considerato idoneo al riutilizzo, ipotizzando che tutto il terreno sia possibile classificarlo come sottoprodotto, in quanto non è presente nel progetto di PFTE la caratterizzazione chimica prevista dal DPR 120/2017[16] che verrà effettuata nelle fasi progettuali successive. Le movimentazioni interne al cantiere sono state ipotizzate pari a 2 km. In questo caso specifico, essendoci un deficit di materiale necessario pari a 2.420,91 mc, il materiale di riporto non potrà essere coperto interamente dallo sterro disponibile. Quindi il riutilizzo interno copre il 100% dello sterro sciolto disponibile (77.398,99 mc), la parte mancante viene compensata dalla cava di prestito per 2.420,91 mc posta alla stessa distanza descritta nello scenario A. In termini percentuali il materiale riutilizzato rispetto al riporto necessario è pari al 96,97%.

4.3.3 Scenario C – Minimo CAM: soglia minima di riutilizzo (70%)

Lo scenario C rappresenta il caso minimo di riutilizzo del materiale da scavo previsto dal decreto. In questo caso si considera come soglia minima CAM il 70% di materiale recuperato sul volume di riporto necessario, corrispondente a 55.873,93 mc di riutilizzo interno del materiale da scavo, mentre la parte restante del fabbisogno di riporto, pari a 23.945,97 mc, viene approvvigionata dal sito di cava come materiale vergine. Il restante sterro non riutilizzato, pari a 21.525,06 mc,

viene smaltito nel sito di discarica. Tutte le distanze dai siti sono le stesse riportate nei casi che precedono.

4.3.4 Scenario intermedi

Sono stati considerati successivamente degli scenari intermedi. Nello scenario D si considera il 100% di materiale da scavo non idoneo che viene portato in discarica, mentre il materiale da riporto viene considerato comunque come scenario che rispetta i CAM minimi in cui il 70% viene approvvigionato dal sito di conferimento e il 30% da cava di prestito. Lo scenario E, invece ipotizza il riutilizzo possibile del 50% del materiale da scavo considerato quindi idoneo, mentre il restante verrà spostato in discarica. Il materiale di riporto necessario per il fabbisogno dell'opera sarà composto per il 50% dal riutilizzo interno, per il 20% dal sito di conferimento, raggiungendo così il 70% di materiale riciclato previsto dai CAM, e per il restante 30% dalla cava di prestito.

4.3.5 Sintesi degli scenari e conformità CAM

Per ciascuno scenario, sono stati valutati rispettivamente: la percentuale di riutilizzo del materiale da scavo e la percentuale di materiale recuperato impiegato nel riporto, verificando la conformità al requisito minimo del 70% previsto dai CAM Strade (D.M. 05/08/2024[20], descritto nel paragrafo 2.3.1).

Per questa conformità sono stati utilizzati differenti indicatori:

- L'indicatore I_1 esprime la quota di materiale scavato effettivamente riutilizzata internamente al cantiere rispetto al volume totale di sterro sciolto disponibile (77.398,99 mc):

$$I_1 = \frac{V_{riutilizzato}}{V_{sterro\ sciolto\ totale}} \cdot 100$$

- Gli indicatori I_2 , I_3 e I_4 sono riferiti al volume totale di riporto sciolto necessario per la realizzazione dell'opera (79.819,90 mc):

$$I_2 = \frac{V_{riutilizzato}}{V_{riporto\ sciolto\ necessario}} \cdot 100$$

$$I_3 = \frac{V_{materiale\ riciclato\ esterno}}{V_{riporto\ sciolto\ necessario}} \cdot 100$$

- L'indice I_4 rappresenta il materiale recuperato totale impiegato nel riporto ed è dato dalla somma di I_2 e I_3 . Inoltre tale parametro è utilizzato per verificare la conformità al criterio del paragrafo 2.3.1 del D.M. 05/08/2024[20] in Allegato 1.

Viene riportata di seguito in Tabella 4.6 una sintesi dei risultati per ciascuno scenario e indicatore.

Tabella 4.6: Sintesi degli scenari e conformità ai CAM Strade

Scenario	I_1 - Bilancio terre (%)	I_2 - CAM interno (%)	I_3 - CAM esterno (%)	I_4 - CAM totale (%)	Conforme CAM ($\geq 70\%$)
Scenario A (Peggior)	0,0	0,0	0,0	0,0	No
Scenario B (Ottimale)	100,0	96,97	0,0	96,97	Si
Scenario C (Min. CAM)	72,2	70,0	0,0	70,0	Si
Scenario D (Intermedio 1)	0,0	0,0	70,0	70,0	Si
Scenario E (Intermedio 2)	50,0	48,5	21,5	70,0	Si

4.4 Risultati

In questo paragrafo vengono descritti i parametri che sono stati utilizzati per il confronto degli scenari precedentemente citati. I parametri fondamentali per l'analisi sono: i veh·km per ciascuna tratta considerando due tipologie di mezzo di trasporto del materiale, la pianificazione del trasporto utilizzando un numero differente di mezzi e l'impronta carbonica di CO₂ durante il trasporto.

I risultati ottenuti vengono discussi e interpretati nel paragrafo 4.5.

4.4.1 Veh·km per tratta, per mezzo e per scenario

Applicando la metodologia descritta nel paragrafo 4.1.2 vengono riportati di seguito i veh·km calcolati per ciascuno scenario considerando entrambe le tipologie di mezzo di trasporto del materiale. Il numero di viaggi per tratta e per scenario è possibile visionarli in dettaglio nelle Tabelle B.1 e B.2 in Appendice B.

Le Tabelle 4.7 e 4.8 che seguono, riportano i veh·km suddivisi per singola tipologia di tratta, consentendo di identificare il contributo di ciascun sito al totale per ciascuno scenario.

Tabella 4.7: Veh·km per tratta e per scenario — Autocarro (10 mc)

Scenario	Tratta interna (veh·km)	Discarica (veh·km)	Cava (veh·km)	Conferimento (veh·km)	Totale (veh·km)
Scenario A (Peggior)	0,00	538.704,00	373.557,60	0,00	912.261,60
Scenario B (Ottimale)	30.960,00	0,00	11.372,40	0,00	42.332,40
Scenario C (Min. CAM)	22.352,00	149.848,80	112.086,00	0,00	284.286,80
Scenario D (Intermedio 1)	0,00	538.704,00	112.086,00	182.168,80	832.958,80
Scenario E (Intermedio 2)	15.480,00	269.352,00	112.086,00	56.006,80	452.924,80

Tabella 4.8: Veh·km per tratta e per scenario — Autoarticolato (20 mc)

Scenario	Tratta interna (veh·km)	Discarica (veh·km)	Cava (veh·km)	Conferimento (veh·km)	Totale (veh·km)
Scenario A (Peggior)	0,00	269.352,00	186.778,80	0,00	456.130,80
Scenario B (Ottimale)	15.480,00	0,00	5.709,60	0,00	21.189,60
Scenario C (Min. CAM)	11.176,00	74.959,20	56.066,40	0,00	142.201,60
Scenario D (Intermedio 1)	0,00	269.352,00	56.066,40	91.084,40	416.502,80
Scenario E (Intermedio 2)	7.740,00	134.676,00	56.066,40	28.003,40	226.485,80

4.4.2 Pianificazione dei trasporti

L'obiettivo della pianificazione è importante, perché permette di capire quanto possano cambiare le durate delle operazioni di trasporto in funzione del numero di mezzi tra i differenti scenari considerati nell'analisi. Per il confronto sono stati ipotizzati i parametri di input che sono descritti nella Tabella 4.9.

Tabella 4.9: Parametri di pianificazione del trasporto

Parametro	Valore	Unità
Velocità media tratte esterne (discarica/cava/conferimento)	40	km/h
Velocità media movimenti interni al cantiere	20	km/h
Ore di lavoro per turno	8	h/turno
Tempo medio di carico e scarico del materiale per il viaggio	30	min/viaggio

La velocità media delle tratte esterne è stata ipotizzata, a titolo conservativo, pari a 40 km/h, considerando che il percorso per raggiungere la discarica, la cava di prestito e il sito di conferimento è un tratto misto extraurbano con mezzi pesanti, mentre la velocità media dei movimenti interni al cantiere è dimezzata, in quanto si percorrono tratti brevi con frequenti manovre su terreno di cantiere. Le ore di lavoro per turno sono state considerate pari a 8, corrispondenti a un turno standard. Infine, è stato adottato, a titolo di ipotesi progettuale, un tempo medio di carico e di scarico del materiale (attesa, posizionamento e carico con escavatore) per ciascun viaggio pari a 30 minuti.

A partire dalla distanza andata e ritorno verso ciascun sito ($d_{A/R}$) [km] e dalla velocità media di percorrenza (V_m) [km/h] riportata in Tabella 4.9, è stato calcolato il tempo di percorrenza (T_p) [h] tramite la seguente formula:

$$T_p = \frac{d_{A/R}}{V_m}$$

L'analisi prosegue con la determinazione del tempo di ciclo (T_c) [h] sommando ciascun valore appena determinato rispetto all'ipotesi di tempo medio di carico e scarico del materiale (t) riportato in Tabella 4.9.

$$T_c = T_p + t$$

Successivamente, noti il tempo di ciclo e le ore di lavoro (T_{turno}) per turno riportato in Tabella 4.9, sono stati valutati, arrotondando per eccesso, il numero di viaggi che riesce a compiere ogni giorno ciascun mezzo ($N_{v/g}$).

$$N_{v/g} = \left\lceil \frac{T_{turno}}{T_c} \right\rceil$$

I risultati dei tempi di percorrenza e di ciclo e del numero di viaggi per mezzo al giorno per ciascuna tratta sono riportati in dettaglio nella Tabella B.3 in Appendice B.

L'analisi per la pianificazione prosegue determinando il fabbisogno in mezzo-giornate($mz \cdot gg$) sia per il mezzo autocarro che autoarticolato, dividendo il numero di viaggi per ciascun sito e scenario, che sono stati descritti nel paragrafo 4.1.2, per i viaggi che ciascun mezzo riesce a fare in una giornata lavorativa ($N_{v/g}$).

$$mz \cdot gg = \frac{N_{viaggi}}{N_{v/g}}$$

Il fabbisogno totale in mezzo-giornate per ciascuno scenario è ottenuto sommando i contributi di tutte le tratte attive in quello scenario, ovvero solo quelle per cui è previsto un movimento di materiale. I risultati sono riportati in Appendice B nella Tabella B.4 per gli autocarri e nella Tabella B.5 per gli autoarticolati.

A partire dal fabbisogno totale in mezzo-giornate, è possibile determinare i giorni lavorativi necessari dividendo il valore ottenuto per il numero di mezzi impiegati. È stata adottata l'ipotesi che i mezzi operino in parallelo sulle diverse tratte contemporaneamente, ovvero che più mezzi possano lavorare simultaneamente su tratte diverse. Tale ipotesi è giustificata dalle dimensioni del cantiere in esame, che consente la movimentazione contemporanea del materiale su più fronti. I risultati sono riportati nelle tabelle seguenti per entrambe le tipologie di mezzo, al variare del numero di mezzi impiegati.

Tabella 4.10: Tabella fleet - giorni lavorativi necessari - autocarro 10 mc

N. mezzi	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
5	916	153	365	823	506
10	458	77	183	412	253
15	306	51	122	275	169
20	229	39	92	206	127
30	153	26	61	138	85
50	92	16	37	83	51

Tabella 4.11: Tabella fleet - giorni lavorativi necessari – autoarticolato 20 mc

N. mezzi	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
5	458	77	183	412	253
10	229	39	92	206	127
15	153	26	61	138	85
20	115	20	46	103	64
30	77	13	31	69	43
50	46	8	19	42	26

4.4.3 Emissioni di CO₂ da trasporto e risparmio per scenario

Per determinare le emissioni di CO₂ generate da trasporto su gomma del materiale da scavo è necessario disporre di diversi fattori emissivi che sono specifici per categorie di veicolo e di velocità media di percorrenza. Il database ufficiale standard utilizzato dagli stati membri dell'Unione Europea per valutare le emissioni nel settore dei trasporti è l'EMEP/EEA COPERT v5.9.1, sviluppato dall'EEA (*European Environment Agency*), l'Agenzia Europea dell'Ambiente, in collaborazione con l'EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*). Nel caso studio è stata utilizzata l'Appendice 4 del Guidebook[37], che raccoglie i coefficienti specifici per categoria veicolare, standard emissivo, pendenza e fattore di carico.

In assenza di dati specifici sul parco veicoli del cantiere, i mezzi di trasporto considerati nel caso in esame sono stati ipotizzati alimentati a diesel, in quanto la maggior parte dei veicoli pesanti da cantiere sono di questo tipo, rendendo tale assunzione ragionevole e cautelativa.

Il database COPERT fornisce inquinanti differenti, tra cui CO, NO_x, VOC, PM, EC, ma non la CO₂ dei veicoli pesanti diesel, in quanto questa dipende esclusivamente dal carburante consumato, per questo motivo per la determinazione dell'impronta carbonica emessa dai veicoli pesanti (HDV, *Heavy Duty Vehicles*) è stata utilizzata la EC (*Energy Consumption*). Quest'ultima, diversamente dagli altri inquinanti, è espressa in MJ/km. Tale parametro rappresenta il consumo energetico del veicolo per chilometro percorso e consente di ricavare, attraverso una formula, il valore di emissione di anidride carbonica.

La dipendenza del consumo energetico dalla velocità è descritta dalla formula generica eq.(25) del Guidebook EMEP/EEA[37], valida per tutte le categorie veicolari, applicando i coefficienti specifici per i due mezzi considerati (si veda Appendice). In assenza di valori precisi inerenti alla

pendenza del percorso che deve effettuare il veicolo per raggiungere i siti, è stato ipotizzato seguendo quanto raccomanda anche lo stesso Guidebook EMEP/EEA[37] un valore pari a 0. Per quanto riguarda il fattore di carico è stato assunto un valore pari a 0,5 che corrisponde al valore di default raccomandato dal Guidebook EMEP/EEA[37] per i veicoli pesanti, valore che inoltre risulta coerente con le ipotesi del caso studio in cui ogni viaggio comprende un'andata a pieno carico e un ritorno a vuoto. I coefficienti specifici per i due mezzi considerati, estratti dall'Appendice 4 del Guidebook EMEP/EEA[37] applicando i parametri sopra descritti, sono riportati nella Tabella B.6 in Appendice B.

In Figura 4.1 vengono rappresentati graficamente la dipendenza del fattore di consumo energetico (ECF) rispetto alla velocità.

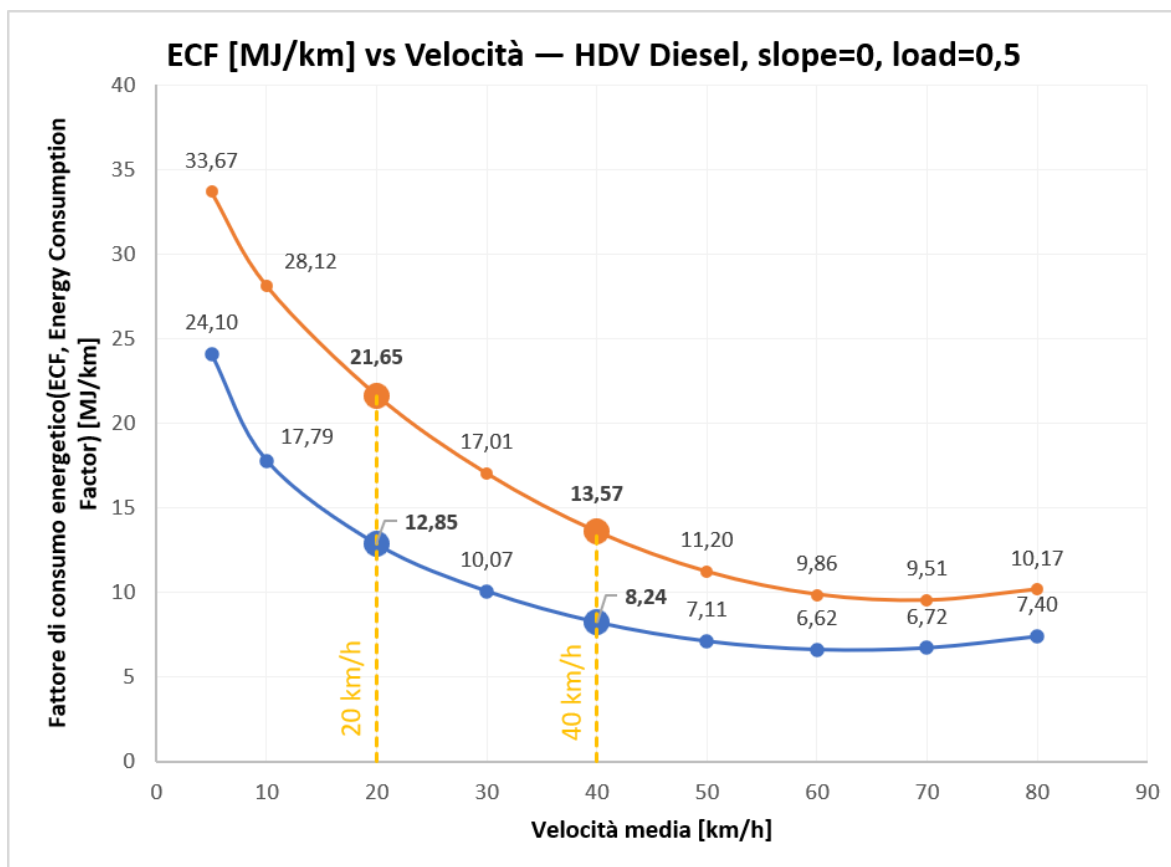


Figura 4.1: ECF [MJ/km] in funzione della velocità media — HDV Diesel, Euro VI A/B/C, slope=0, load=0,5.

Fonte: elaborazione propria su dati EMEP/EEA COPERT v5.9.1[37].

Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, i valori di consumo energetico per entrambi i mezzi risultano minori con velocità media pari a 40 km/h rispetto ai 20 km/h, in quanto a velocità basse il motore diesel lavora in condizioni di bassa efficienza termica che comportano maggiori perdite di calore e di attrito nel tempo. Il fenomeno appena descritto è rappresentato

dal termine δ/V , presente nell'eq (25) del Guidebook EMEP/EEA[37], il cui contributo aumenta significativamente al diminuire della velocità. Invece, ad alte velocità, la resistenza aerodinamica, proporzionale al quadrato della velocità, è rappresentata dal termine $\alpha \cdot V^2$ della formula stessa. In questo modo, come è visibile dal grafico che segue, il valore minimo di consumo energetico si ha con una velocità di percorrenza di 60-65 km/h.

A partire dal valore di ECF [MJ/km], la corrispondente emissione di CO₂ [g/km] è ottenuta applicando la seguente relazione:

$$CO_2 [g/km] = ECF [MJ/km] \cdot 74,1 [gCO_2/MJ]$$

Il valore 74,1 è stato ricavato dalla Tabella 3.5.2 dell'IPCC 2006[38] riportata nella Figura 4.2

TABLE 3.5.2 CO ₂ EMISSION FACTORS				
kg/TJ				
Fuel		Default	Lower	Upper
Gasoline		69 300	67 500	73 000
Other Kerosene		71 900	70 800	73 600
Gas/Diesel Oil		74 100	72 600	74 800
Residual Fuel Oil		77 400	75 500	78 800
Liquefied Petroleum Gases		63 100	61 600	65 600
Other Oil	Refinery Gas	57 600	48 200	69 000
	Paraffin Waxes	73 300	72 200	74 400
	White Spirit & SBP	73 300	72 200	74 400
	Other Petroleum Products	73 300	72 200	74 400
Natural Gas		56 100	54 300	58 300

Figura 4.2: Fattori di emissione di CO₂ [38]

Come è visibile dalla figura, tutti i valori sono espressi con l'unità di misura [kg/TJ]. Nel caso studio in esame, i mezzi di movimentazione terra sono stati ipotizzati in Diesel, quindi il valore utilizzato per l'analisi è il valore di default 74.100 kg/TJ che con opportune trasformazioni consente di ottenere 74,1 g/MJ.

Tale valore deriva dalla seguente formula:

$$74,1 \text{ gCO}_2/\text{MJ} = 20,2 [\text{kgC}/\text{GJ}] \cdot 1 \cdot (44/12)$$

Dove:

- 20,2 kgC/GJ = contenuto di carbonio del gasolio (IPCC 2006, Tab. 1.4[38]);
- 1 = fattore di ossidazione;
- 44/12 = rapporto molecolare CO₂/C.

La Figura 4.3 mostra la variazione di CO₂ in funzione della velocità media per i due mezzi considerati e sono evidenziate le velocità di progetto di 20 km/h e 40 km/h.

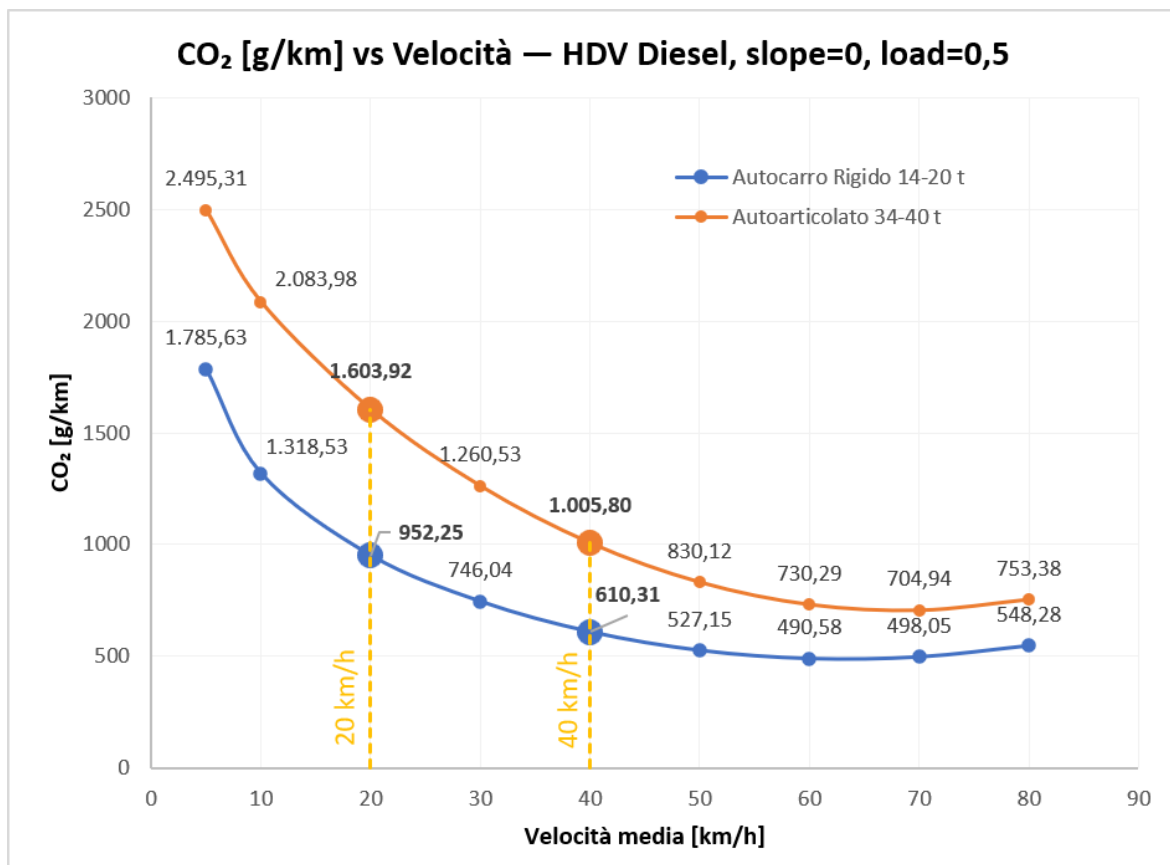


Figura 4.3: CO₂ [g/km] in funzione della velocità media — HDV Diesel, Euro VI A/B/C, slope=0, load=0,5.

Fonte: elaborazione propria su dati EMEP/EEA COPERT v5.9.1 [37].

Per ciascuno scenario l'emissione totale di CO₂ è stata determinata differenziando il fattore emissivo in base alla tratta percorsa. I veh·km relativi alle tratte esterne (scarica, cava e sito di conferimento) sono stati moltiplicati per il fattore corrispondente a 40 km/h, mentre i veh·km dei movimenti interni al cantiere, dove presenti, sono stati moltiplicati per il fattore corrispondente a 20 km/h. I valori ottenuti sono stati sommati per ottenere l'emissione totale di CO₂ per scenario.

Seguendo questa metodologia vengono riportati nelle Tabelle 4.12 e 4.13 le emissioni totali considerando le due differenti tipologie di mezzi.

Tabella 4.12: Emissione totale di CO₂ [t] – autocarro 10 mc

Scenario	CO ₂ totale [t]
Scenario A (Peggior)	556,76
Scenario B (Ottimale)	36,42
Scenario C (Min. CAM)	181,15
Scenario D (Intermedio 1)	508,36
Scenario E (Intermedio 2)	281,72

Tabella 4.13: Emissione totale di CO₂ [t] – autoarticolato 20 mc

Scenario	CO ₂ totale [t]
Scenario A (Peggior)	458,78
Scenario B (Ottimale)	30,57
Scenario C (Min. CAM)	149,71
Scenario D (Intermedio 1)	418,92
Scenario E (Intermedio 2)	232,43

In entrambi i mezzi lo scenario A risulta quello peggiore, mentre lo scenario B il migliore. A parità di scenario, l'autoarticolato da 20 mc genera emissioni di CO₂ inferiori rispetto all'autocarro da 10 mc, questo deriva dal fatto che vengano effettuati un minor numero di viaggi necessari a fronte di una capacità di carico doppia.

4.5 Discussione dei risultati

Nei lavori stradali una parte significativa delle emissioni è causata dai trasporti di materiale su gomma. Il riutilizzo del materiale da scavo internamente al cantiere consente di ridurre i chilometri percorsi, evitando sia il conferimento in discarica sia l'approvvigionamento di materiale vergine da cava. Questo comporta un duplice beneficio ambientale già nelle prime fasi di progetto: si preservano le risorse naturali e si abbattano le emissioni di trasporto.

I risultati quantitativi ottenuti vengono qui interpretati in chiave ambientale, economica e metodologica, al fine di evidenziare le implicazioni pratiche dell'applicazione dei CAM Strade in fase di PFTE.

4.5.1 Benefici ambientali e operativi del riutilizzo CAM

Per comodità di lettura, in questo paragrafo, si riportano in forma grafica i dati già presentati precedentemente in modo tabellare.

Nelle Figure 4.4 e 4.5 vengono rappresentati i veh·km totali necessari per entrambe le tipologie di mezzo considerate nell'analisi.

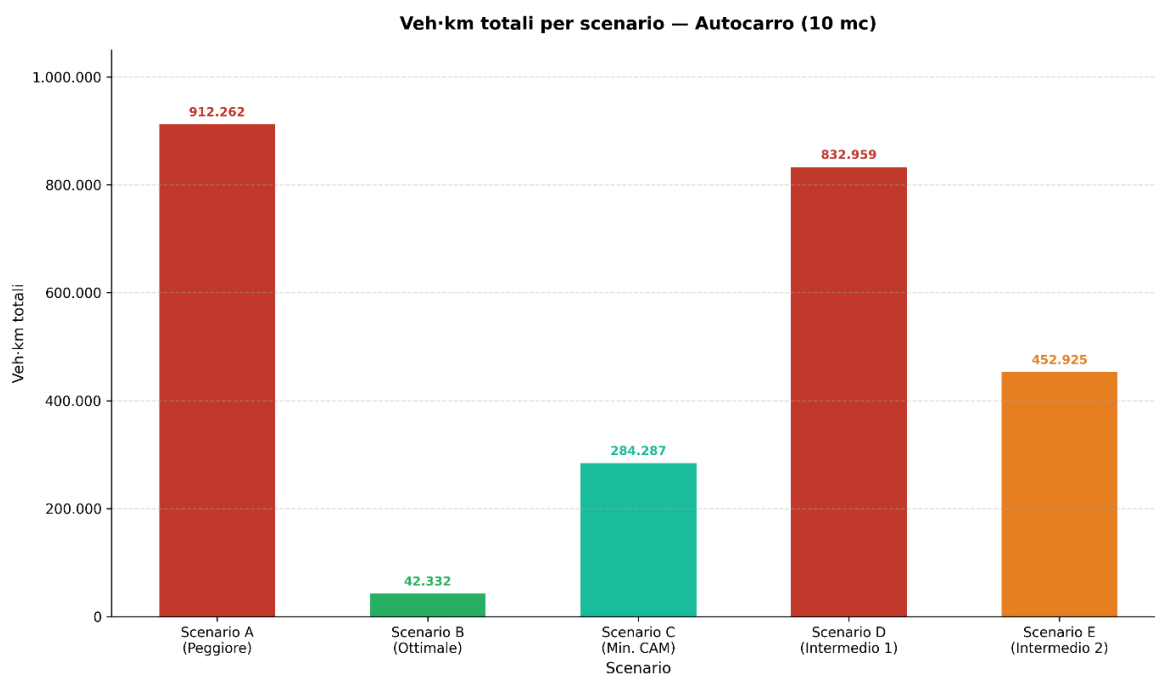


Figura 4.4: Veh·km totali per scenario — Autocarro (10 mc). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.

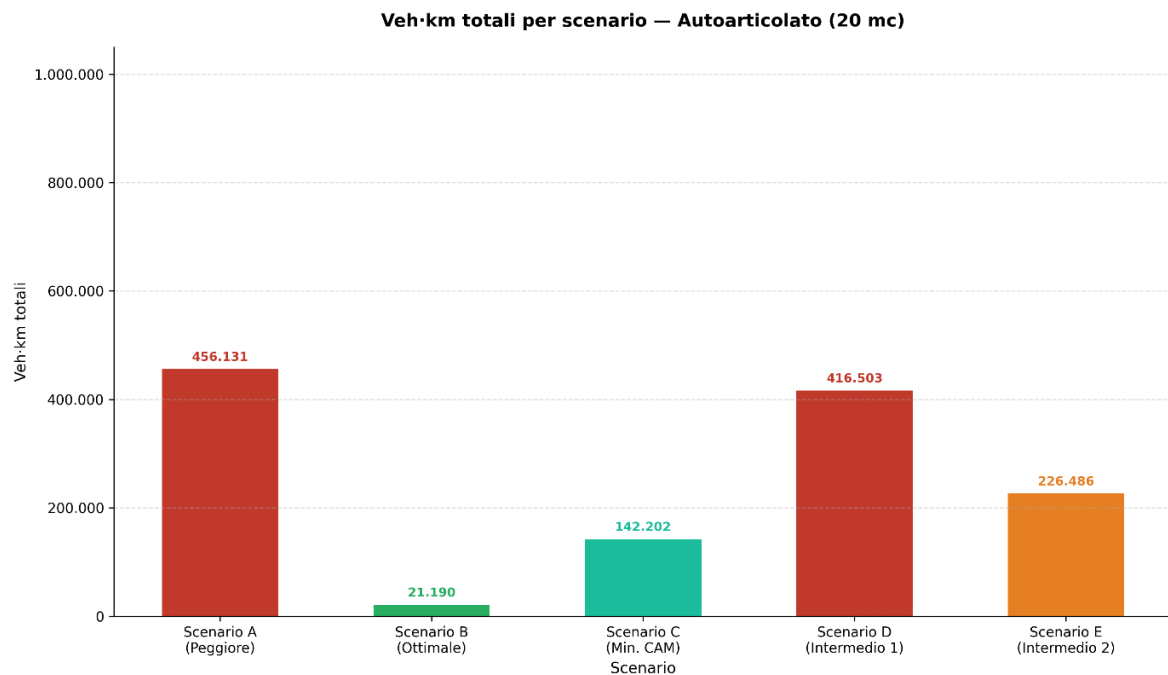


Figura 4.5: Veh·km totali per scenario — Autoarticolato (20 mc). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.

Si nota intuitivamente quanto sia significativa la differenza di chilometri complessivi tra i differenti scenari con un range compreso tra un massimo di 912.262 veh·km nello Scenario A ad un minimo di 42.332 veh·km nello Scenario B considerando come mezzo l'autocarro, mentre per gli autoarticolati i valori sono dimezzati.

Per apprezzare meglio il confronto tra gli scenari vengono illustrate in Figura 4.6 le riduzioni significative dei veh·km al variare della strategia di gestione delle terre da scavo.

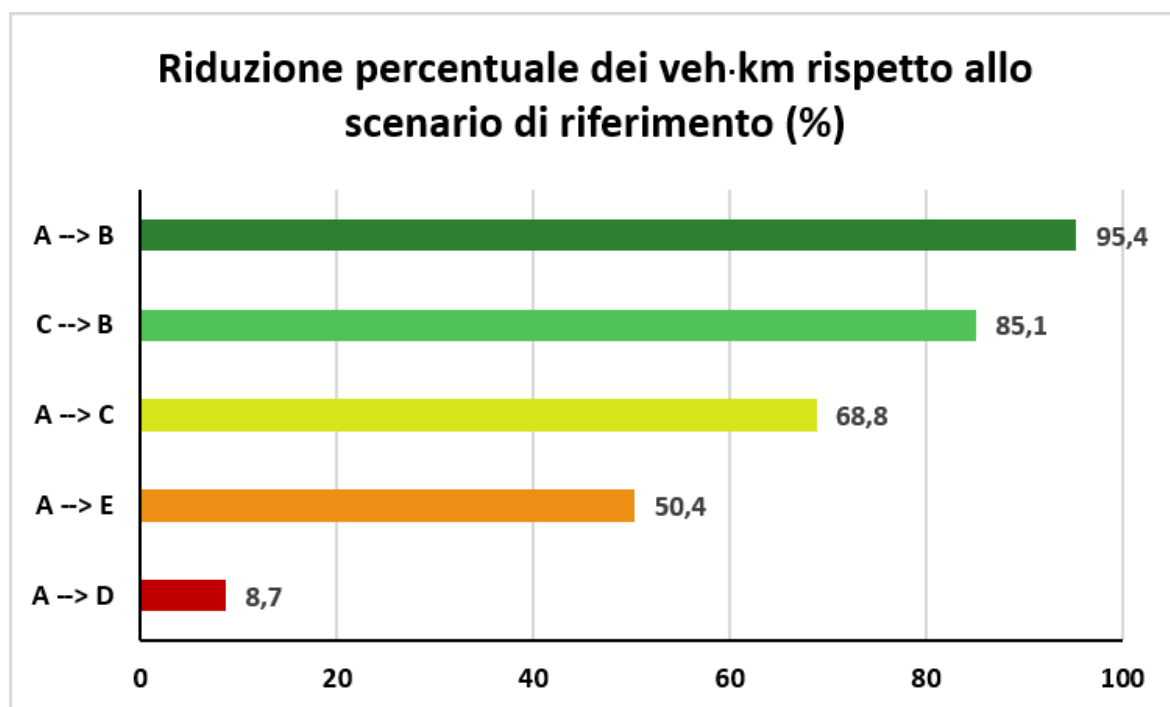


Figura 4.6: Riduzione percentuale dei veh·km rispetto allo scenario di riferimento. Elaborazione propria.

Le riduzioni percentuali risultano identiche per entrambe le tipologie di mezzo utilizzate nell'analisi, in quanto i valori assoluti dell'autoarticolato sono proporzionalmente dimezzati rispetto all'autocarro a parità di volume del materiale trasportato. I valori che vengono rappresentati nella Figura 4.6 derivano dalla Tabella 4.7 e 4.8.

Tra tutti gli scenari confrontati, lo Scenario B registra la riduzione più significativa dei veh·km pari al 95,4% rispetto allo Scenario A.

Il confronto tra lo Scenario C e lo Scenario B evidenzia una riduzione dei veh·km pari all'85,1%. Questo risultato dimostra che anche rispettando la soglia minima CAM del 70%, esiste ancora un margine di miglioramento significativo massimizzando il riutilizzo interno.

Lo Scenario C, che rappresenta la soglia minima CAM, riduce già i veh·km del 68,8% rispetto allo Scenario A, dimostrando che anche la sola conformità minima ai criteri CAM produce un impatto ambientale significativo.

Lo Scenario E, scenario intermedio con riutilizzo parziale, riduce i veh·km del 50,4% rispetto allo Scenario A, dimostrando che anche soluzioni parziali portano benefici ambientali rilevanti.

Lo Scenario D, pur rispettando formalmente i CAM attraverso l'approvvigionamento esterno di materiale riciclato, registra una riduzione di soli 8,7% rispetto allo Scenario A. Questo

evidenzia che il modo in cui si raggiunge la soglia CAM è determinante: il riutilizzo interno è molto più efficace dell'approvvigionamento esterno.

Come descritto nelle Tabelle 4.10 e 4.11, i giorni lavorativi necessari per completare lo spostamento del materiale con i mezzi variano molto tra i differenti scenari.

Viene riportato nella Figura 4.7 un confronto dei giorni lavorativi per ciascuno scenario e considerando le due tipologie di mezzo.

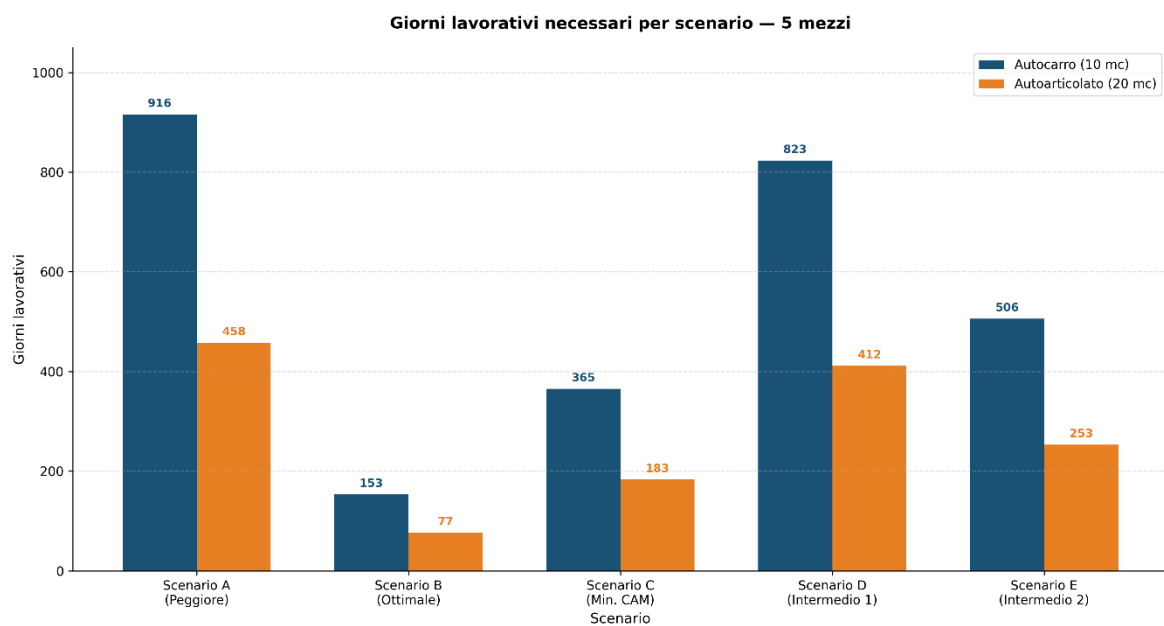


Figura 4.7: Giorni lavorativi necessari per scenario con 5 mezzi — confronto tra autocarro (10 mc) e autoarticolato (20 mc). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.

Prendendo come riferimento alcuni valori più significativi, si può dedurre che con l'impiego degli autocarri da 10 mc e utilizzando 5 mezzi lo Scenario A prevede 916 giorni lavorativi, mentre lo Scenario B ne richiede 153, ne consegue una riduzione dell'83%.

Lo Scenario C (soglia minima CAM) richiede 365 riducendo per più della metà i tempi rispetto allo Scenario A.

Gli Scenari D ed E, intermedi tra A e B, richiedono rispettivamente 823 e 506 giorni lavorativi, confermando che una maggiore quota di riutilizzo interno si traduce direttamente in una riduzione dei tempi operativi.

In base alla disponibilità dei mezzi da cantiere, si può notare dalle Tabelle 4.10 e 4.11 che aumentando il numero di mezzi che lavorano contemporaneamente comporta una riduzione

significativa dei giorni lavorativi. Inoltre, a parità di scenario, l'impiego di autoarticolati da 20 mc dimezza ulteriormente i giorni lavorativi rispetto agli autocarri, grazie alla maggior capacità di carico. Con 5 autoarticolati lo Scenario A richiede 458 giorni lavorativi, lo Scenario B 77, lo Scenario C 183, lo Scenario D 412 e lo Scenario E 253, confermando il dimezzamento rispetto ai corrispondenti valori con autocarro.

Da quanto appena scritto, si deduce che il numero di giorni lavorativi necessari dipende dalla tipologia di mezzi disponibili, quindi dalla capacità di carico e dal numero di mezzi stessi che possono essere utilizzati.

Secondo quanto riportato nel documento PIARC [15], descritto nel paragrafo 1.2.3, il trasporto dei materiali rappresenta il 60-70% dell'impronta carbonica della mobilità di cantiere. Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica del caso studio in esame vengono riportate di seguito le Figure 4.8 e 4.9 dei risultati conseguiti dall'analisi.

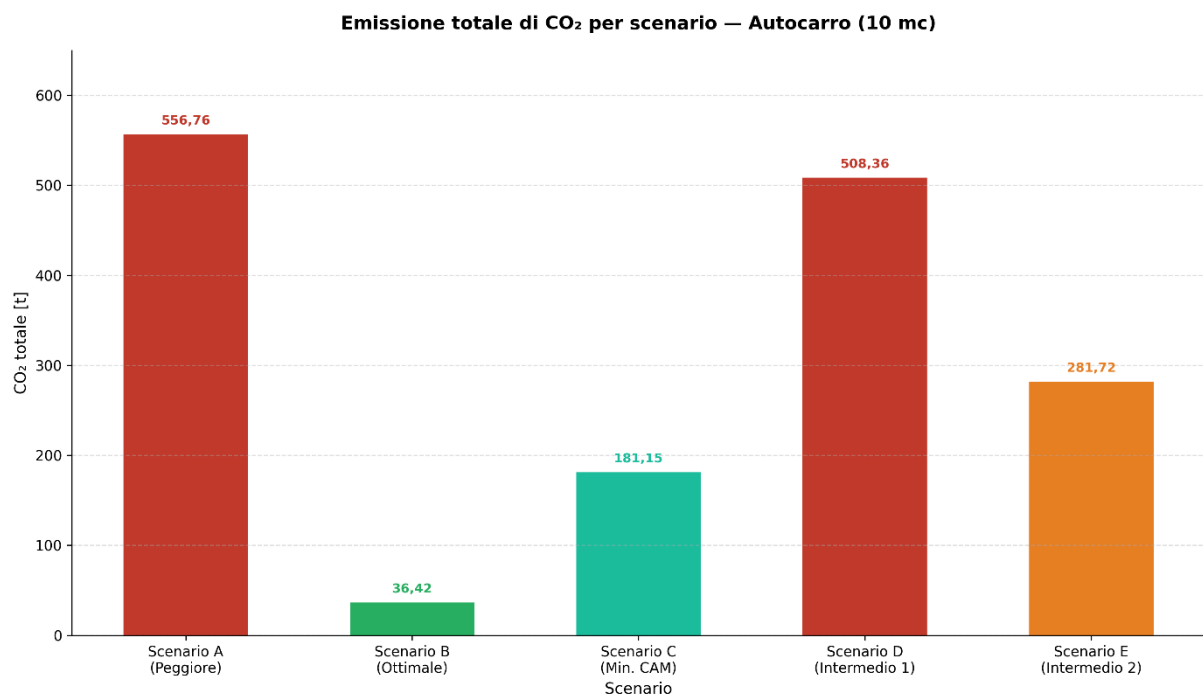


Figura 4.8: Emissione totale di CO₂ per scenario — Autocarro (10 mc). Elaborazione propria.

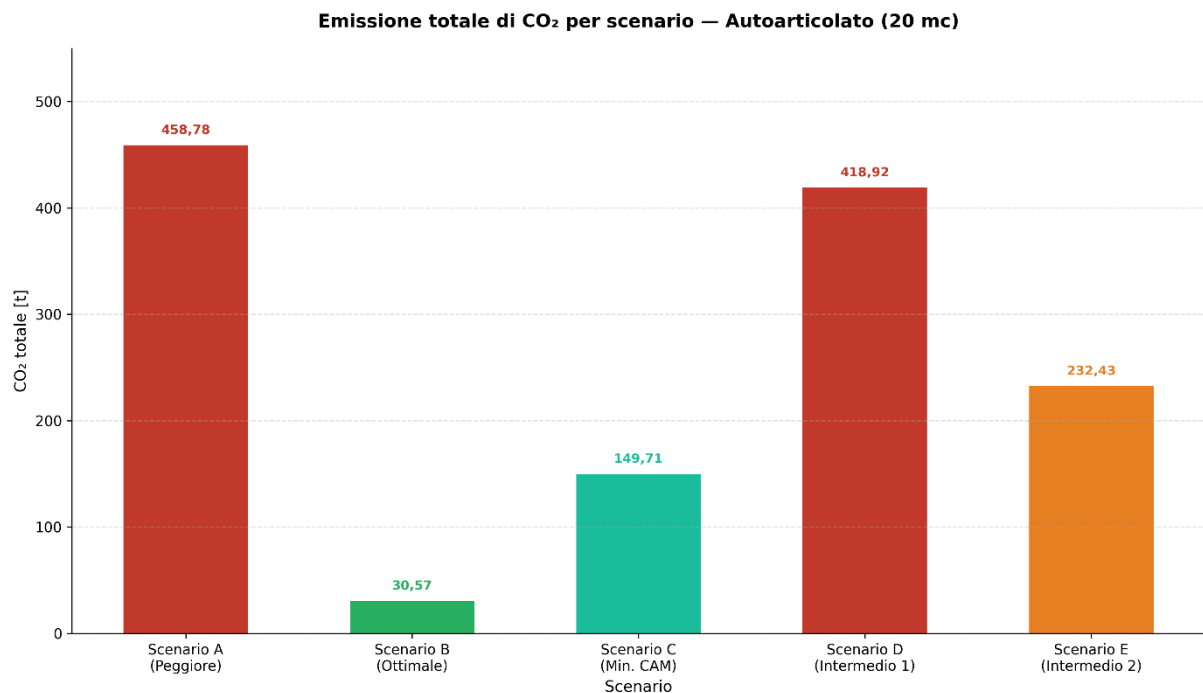


Figura 4.9: Emissione totale di CO₂ per scenario — Autoarticolato (20 mc). Elaborazione propria.

Le emissioni di CO₂ legate al trasporto variano da 36,42 t (Scenario B) a 556,76 t (Scenario A) con autocarri da 10 mc, confermando come la strategia di gestione delle terre incida significativamente sull'impronta carbonica complessiva del cantiere.

I valori emissivi di CO₂ delle due differenti tipologie di mezzi, rispecchiano una riduzione pressoché identica tra gli stessi scenari confrontati nei veh·km. Questo deriva dalla proporzionalità diretta tra le emissioni di CO₂ e i veh·km. Inoltre, a parità di scenario, l'impiego di autoarticolati da 20 mc riduce le emissioni di CO₂ di circa il 17% rispetto agli autocarri da 10 mc, con un range di variazione minima tra gli scenari pari a 16,1% - 17,6%. Questo conferma che la scelta del mezzo incide costantemente e indipendentemente dalla strategia di gestione delle terre che si adotta.

I risultati confermano che il riutilizzo interno del materiale da scavo rappresenta la strategia più efficace per ridurre simultaneamente i veh·km, i giorni lavorativi e le emissioni di CO₂ durante la fase di cantiere.

4.5.2 Limiti dell'analisi e possibili sviluppi

L'analisi effettuata nel presente lavoro, coerente con il livello di approfondimento del PFTE, presenta alcuni limiti che dovranno essere superati nelle fasi successive di progettazione.

Un primo limite riguarda l'idoneità chimica: se il materiale non fosse classificabile come sottoprodotto secondo il DPR 120/2017[16], il riutilizzo interno non sarebbe possibile e i CAM perderebbero efficacia. Per questo motivo è necessario nelle fasi progettuali future effettuare una caratterizzazione chimica del materiale integrando il Piano di Utilizzo, individuando le effettive possibilità di gestione delle terre.

Inoltre, un secondo limite deriva dalla effettiva localizzazione di impianti di recupero che siano vicini all'opera infrastrutturale in progetto, come dimostrato dallo scenario D rispetto allo scenario A dell'analisi, registrando una riduzione delle emissioni di CO₂ molto contenuta rispetto agli altri scenari. Se la localizzazione del sito di conferimento fosse più distante dalla cava di prestito, non ci sarebbe stato un abbassamento emissivo, bensì un aumento. Si deduce che a livello di emissioni dovute al trasporto da gomma, non sempre rispettare i CAM, comporta un effettivo beneficio ambientale. Per quantificare complessivamente le emissioni è necessario effettuare uno studio LCA completo ad esempio considerando le emissioni derivate dall'estrazione del materiale vergine e tutto quello che ne consegue.

Un terzo limite riguarda le distanze stimate dai siti, in quanto non tengono conto delle restrizioni per mezzi pesanti. Le distanze dovranno essere verificate e affinate nel Progetto Definitivo tenendo conto dei percorsi effettivi consentiti ai mezzi pesanti.

Un quarto limite riguarda i coefficienti di rigonfiamento e costipamento utilizzati nell'analisi, stimati in fase di PFTE sulla base delle caratteristiche geologiche del terreno. Tali coefficienti dovranno essere verificati e aggiornati nel Progetto Definitivo a seguito di indagini geotecniche puntuali, in quanto eventuali variazioni potrebbero modificare sensibilmente i volumi di scavo e riporto e di conseguenza i veh·km calcolati.

Un ulteriore limite riguarda le ipotesi adottate nella pianificazione dei trasporti, in particolare l'assunzione che i mezzi lavorino contemporaneamente in parallelo su diverse tratte. Nella realtà operativa di cantiere la situazione è più complessa, in quanto la disponibilità effettiva dei mezzi e le interferenze tra le diverse lavorazioni potrebbero influenzare il parallelismo che è stato ipotizzato, comportando un incremento dei giorni lavorativi rispetto a quelli che sono stati ricavati dall'analisi. Una stima più accurata richiederebbe un'analisi di cantiere più dettagliata rispetto a quella attuale che dovrà essere disponibile nelle fasi di progettazione future.

Un possibile sviluppo futuro riguarda l'estensione dell'analisi ai volumi di scavo delle gallerie, sia naturali che artificiali, che per dimensioni e natura del materiale richiederebbero una trattazione separata.

5 Adeguamento del Capitolato Speciale D'Appalto (CSA) ai CAM Strade

Il presente lavoro si colloca in una fase di progettazione preliminare (PFTE), nella quale il Capitolato Speciale Prestazionale (CSP) fornisce indicazioni di carattere generale sulle lavorazioni senza entrare nel dettaglio operativo della gestione delle terre da scavo. Nelle prospettive future di sviluppo del progetto verso il livello esecutivo, il capitolato dovrà essere integrato con una voce specifica sui movimenti terra adeguata ai CAM Strade di cui al DM 05/08/2024[20]. A tal fine, il presente capitolo propone uno schema delle clausole da integrare nel CSA del Progetto Esecutivo, ai sensi del D.Lgs. 50/2016 [13].

Attualmente l'Art.6 del Capitolato Speciale Prestazionale del progetto in esame [39] tratta esclusivamente la demolizione e la scarifica del pacchetto stradale, lasciando un vuoto normativo sulla gestione delle terre da scavo rispetto a quanto richiesto dai CAM Strade. Il paragrafo 2.1.2 del DM 05/08/2024 [20] prescrive che il CSA contenga i requisiti per materiali recuperati, riciclati e sottoprodotti, inclusi gli aggregati da terre da scavo gestite come sottoprodotto ai sensi del DPR 120/2017 [16]. Nel CSP attuale risultano assenti i requisiti minimi percentuali, la gerarchia di valutazione delle categorie e i mezzi di prova necessari a dimostrarne il rispetto.

5.1 Proposta di schema CSA per i movimenti terra

I risultati quantitativi ottenuti dall'analisi descritta nel Capitolo 4 hanno evidenziato come la gestione terre da scavo incida significativamente sui $\text{veh} \cdot \text{km}$, sulle emissioni di CO_2 e sui tempi di cantiere. Questo conferma la necessità di tradurre i criteri CAM in prescrizioni contrattuali concrete e vincolanti, che guidino l'appaltatore nella scelta delle strategie di gestione già dalle prime fasi operative.

La presente sezione propone uno schema di clausole da integrare nel CSA del Progetto Esecutivo per la voce movimenti terra, in conformità ai CAM Strade di cui al DM 05/08/2024[20]. Lo schema è articolato in due parti: i requisiti tecnici e operativi, che definiscono cosa deve fare l'appaltatore incidendo direttamente sulle scelte costruttive e sulla gestione del cantiere, e i requisiti documentali e di verifica, che definiscono cosa deve dimostrare e produrre, ovvero fornire la documentazione necessaria a dimostrare che tali scelte siano state effettivamente rispettate.

Come mostrato dallo Scenario D dell'analisi, il rispetto formale dei CAM senza un'effettiva strategia di riutilizzo interno non produce benefici ambientali significativi. Ne consegue l'indispensabilità di entrambe le componenti, tecnica e documentale, per garantire conformità sostanziale ai criteri CAM.

Le specifiche tecniche e documentali rispettivamente descritte nei sottoparagrafi che seguono, sono da intendersi come indicazioni puramente preliminari che dovranno essere, durante la stesura del CSA in fase di Progetto Esecutivo, strutturate e formalizzate in opportuni capitoli e articoli.

5.1.1 Requisiti tecnici e operativi

Le seguenti specifiche definiscono gli obblighi tecnici dell'Appaltatore nella gestione delle terre da scavo:

- Gerarchia di riutilizzo — il materiale scavato deve essere prioritariamente riutilizzato all'interno del cantiere, in conformità al DPR 120/2017 [16]. Solo nel caso in cui ciò non fosse tecnicamente possibile è consentito il conferimento presso impianti autorizzati. Il ricorso alla discarica è ammesso solo come ultima soluzione, qualora il materiale non risulti idoneo né al riutilizzo né al conferimento.
- Soglia minima di riutilizzo — almeno il 70% in peso secco su secco delle terre da scavo deve essere riutilizzato, in conformità al DM 05/08/2024 [20]. Il materiale riutilizzato deve garantire le stesse prestazioni di un materiale vergine. Qualora non fosse possibile raggiungere tale soglia con il solo materiale interno, è consentita l'integrazione con materiale esterno riciclato o recuperato certificato.
- Classificazione del materiale — prima dell'inizio degli scavi, l'Appaltatore verifica le caratteristiche del terreno per classificarlo come sottoprodotto ai sensi del DPR 120/2017 [16]. Se il materiale non risulta classificabile come sottoprodotto, dovrà essere gestito come rifiuto e la quota di riutilizzo interno non potrà essere computata ai fini del raggiungimento della soglia minima del 70%.
- Idoneità tecnica del materiale riutilizzato — il materiale destinato al riutilizzo nei rilevati deve rispettare i requisiti geotecnici prescritti dal capitolato in termini di classi granulometriche e limiti di plasticità, in conformità alle norme tecniche vigenti. I coefficienti di rigonfiamento e costipamento adottati in fase di PFTE dovranno essere

verificati e aggiornati a seguito delle indagini geotecniche previste nel Progetto Definitivo.

- Deposito temporaneo — il materiale scavato in attesa di riutilizzo deve essere conservato nelle aree di deposito temporaneo individuate nel piano di cantierizzazione, in modo da evitare contaminazioni con altri materiali e garantire la tracciabilità fino alla destinazione finale. Le modalità di stoccaggio devono essere descritte nel Piano di Utilizzo.

5.1.2 Requisiti documentali e clausole di verifica

I seguenti requisiti definiscono la documentazione che l'Appaltatore è tenuto a produrre e conservare per dimostrare il rispetto delle prescrizioni tecniche:

- Piano di Utilizzo — redatto prima delle operazioni di scavo in conformità all'Art. 9 del DPR 120/2017 [16], deve contenere la descrizione dei lavori, le caratteristiche chimiche del materiale, i siti di produzione con volumi, i siti di destinazione con distanze, la destinazione d'uso e le modalità di trasporto.
- Relazione CAM — il progettista è tenuto a redigere una Relazione CAM che descriva per ciascun criterio le modalità di rispetto, indicando la gerarchia di valutazione delle categorie di materiale (riciclato, recuperato, sottoprodotto) e, in caso di non applicabilità, fornendo adeguata motivazione, in conformità al DM 05/08/2024 [20].
- Caratterizzazione chimica — eseguita in conformità alla Tab. 4.1 e all'Allegato 2 del DPR 120/2017 [16], con un campione ogni 500 m di tracciato. Il campionamento preliminare effettuato in fase di PFTE a un campione ogni 2.000 m costituisce il riferimento di partenza.
- Certificazioni — per il materiale esterno riciclato o recuperato, l'Appaltatore dimostra il rispetto dei requisiti tramite una delle certificazioni previste dal paragrafo 2.1.2 del DM 05/08/2024 [20].
- Tracciabilità dei trasporti — ogni trasporto di materiale da scavo verso i siti di destinazione deve essere documentato in conformità al DPR 120/2017[16]. Invece, per il materiale classificato come rifiuto si applica il D.Lgs. 152/2006 [17]. La documentazione deve essere conservata per tre anni e resa disponibile al Direttore dei Lavori in qualsiasi momento.

- Registro di avanzamento — periodicamente l'Appaltatore è in dovere di registrare la quantità volumetrica di materiale movimentato, la destinazione e il mezzo utilizzato, per permettere di svolgere in modo continuativo, un controllo del rispetto della soglia del 70% durante le fasi di cantierizzazione.
- Verifica dei percorsi — l'Appaltatore durante la fase di Progetto Esecutivo è tenuto ad effettuare delle verifiche ed eventualmente aggiornare le distanze dai siti di gestione del materiale, tenendo conto delle effettive restrizioni sui veicoli pesanti, in quanto questo potrebbe portare a variazioni significative sui veh·km calcolati negli scenari considerati ed eventualmente, nel caso più drastico a utilizzare siti di gestione differenti.

6 Conclusioni

La presente ricerca ha analizzato un caso studio reale, al fine di dimostrare che l'applicazione dei CAM sulle infrastrutture stradali, già nelle fasi iniziali di PFTE è sia possibile che utile per la gestione delle terre, individuando le strategie migliori per ridurre lo spostamento dei mezzi di trasporto su gomma e le emissioni che ne derivano.

Il rispetto formale dei CAM non è di per sé sufficiente a garantire un beneficio ambientale reale: la strategia di gestione delle terre deve essere valutata caso per caso in funzione delle caratteristiche del materiale e della localizzazione dei siti, in quanto si è dimostrato che il riutilizzo di materiale interno al cantiere rappresenta la soluzione più favorevole.

L'analisi ha dimostrato quanto la pianificazione di cantiere sia incisiva: la scelta dello scenario influenza direttamente i giorni lavorativi di cantiere e il numero di mezzi necessari, questo comporta impatti diretti sulla programmazione dei lavori dell'opera da realizzare.

Le emissioni di CO₂ sono influenzate anch'esse dalla scelta dello scenario, dimostrando nuovamente quanto il riutilizzo interno del materiale riduca drasticamente l'impronta carbonica degli spostamenti.

I risultati ottenuti hanno costituito la base per la predisposizione di uno schema di Capitolato Speciale d'Appalto per la voce movimenti terra, adeguato ai CAM Strade, che rappresenta uno strumento operativo concreto per le fasi progettuali successive al PFTE.

La metodologia sviluppata, basata sull'integrazione tra analisi del bilancio delle terre, stima dei veh·km e valutazione delle emissioni di CO₂, risulta replicabile su altri progetti infrastrutturali, contribuendo all'applicazione sistematica dei criteri di sostenibilità ambientale già nelle fasi iniziali di progettazione.

Appendice A — Elaborati grafici del progetto

Sono riportati di seguito alcuni elaborati grafici del PFTE della Tangenziale Sud Ovest di Asti — A21 Tronco 2, selezionati in quanto direttamente rilevanti per l'analisi del bilancio delle terre sviluppata nel Capitolo 4. Gli elaborati sono stati redatti da Masera Engineering Group S.r.l.

Risvolti applicativi del CAM Strade.
Caso studio relativo al bilancio delle terre
di un progetto di fattibilità tecnico-economica.

INTERVENTI FINALIZZATI AL MIGLIORAMENTO DELLA FUNZIONALITÀ, ACCESSIBILITÀ E FRUIBILITÀ DEL COLLEGAMENTO AUTOSTRADEALE (ALLEGATO L)																			
REALIZZAZIONE DELLA TANGENZIALE SUD OVEST DI ASTI																			
CODIFICA ELABORATI																			
TRONCO	INTERVENTO	LOTTO	FASE	WBS	N° WBS	DISCIPLINA	TITOLO ELABORATO	SCALA	FORMATO	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DIGIT	NOTE	WEEK CONSEGNA	NOME FILE		
ELABORATI GENERALI																			
1	AV	AT	034	PF	EE	001	GEN R	001	A	Elenco Elaborati	-	A4	31/10/2025	A.L	AA - D.C.	SIS	-	AV-AT-034-PF-EE001-GEN-R-001_A	
INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO																			
2	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN R	001	A	Relazione illustrativa e tecnica	-	A4	31/10/2025	A.L	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-R-001_A
	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN D	001	A	Corografia generale d'inquadramento	1:50000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-D-001_A
	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN D	002	A	Planimetria d'inquadramento su CTR	1:10000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-D-002_A
	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN D	003	A	Planimetria generale	1:5000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-D-003_A
	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN D	004	A	Planimetria generale su fotomosaico	1:5000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-D-004_A
	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN D	005	A	Tracciato stradale - alternative progettuali	1:5000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-D-005_A
	AV	AT	034	PF	EG	001	GEN R	002	A	Analisi del traffico	-	A4	31/10/2025	M.L	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-EG001-GEN-R-002_A
GEOLOGIA GEOMORFOLOGIA E IDROGEOLOGIA																			
3	AV	AT	034	PF	GE	001	GEO R	001	A	Relazione geologica	-	A4	31/10/2025	A.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-GE001-GEO-R-001_A
	AV	AT	034	PF	GE	001	GEO D	001	A	Carta geologico-geomorfologica	1:5000	A1	31/10/2025	A.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-GE001-GEO-D-001_A
	AV	AT	034	PF	GE	001	GEO D	002	A	Carta idrogeologica	1:5000	A1	31/10/2025	A.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-GE001-GEO-D-002_A
	AV	AT	034	PF	GE	001	GEO D	003	A	Profilo geologico-geomorfologico	1:5000/5000	A1	31/10/2025	A.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-GE001-GEO-D-003_A
	AV	AT	034	PF	GE	001	GEO R	002	A	Ubicazione indagini geognostiche	-	A4	31/10/2025	A.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-GE001-GEO-R-002_A
IDROLOGIA E IDRAULICA																			
4	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR R	001	A	Relazione idrologica idraulica	-	A4	31/10/2025	F.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-R-001_A
	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR D	001	A	Carta del reticolo idrografico	1:5000	A1	31/10/2025	F.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-D-001_A
	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR D	002	A	Carta del rischio e vincoli idrologici PAI	1:20000	A0	31/10/2025	F.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-D-002_A
	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR D	003	A	Planimetria idraulica di superficie e di piattaforma	1:5000	A1	31/10/2025	F.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-D-003_A
	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR D	004	A	Impianti di trattamento acque di prima pioggia - Schema tipo	1:25	A1	31/10/2025	F.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-D-004_A
	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR D	005	A	Bacina di fitodepurazione - Schema tipo	1:20	A1	31/10/2025	F.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-D-005_A
	AV	AT	034	PF	ID	001	IDR D	006	A	Tombini idraulici e deviazioni canali esistenti - sezioni tipo e particolari	VARIE	A1	31/10/2025	A.D	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-ID001-IDR-D-006_A
ARCHEOLOGIA																			
5	AV	AT	034	PF	AR	001	ARC R	001	A	Relazione archeologica	-	A4	31/10/2025	G.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-AR001-ARC-R-001_A
	AV	AT	034	PF	AR	001	ARC D	001	A	Carta archeologica	VARIE	A3	31/10/2025	G.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-AR001-ARC-D-001_A
ACUSTICA																			
6	AV	AT	034	PF	AC	001	ACS R	001	A	Relazione Previsionale di Impatto Acustico	-	A4	31/10/2025	M.B	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-AC001-ACS-R-001_A
AMBIENTE																			
7	AV	AT	034	PF	AM	001	AMB R	001	A	Studio di prefattibilità ambientale	-	A4	31/10/2025	G.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-AM001-AMB-R-001_A
	AV	AT	034	PF	AM	001	AMB R	002	A	Inquadramento vincolistico - Vincoli paesaggistici e archeologici	1:25000	A1	31/10/2025	G.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-AM001-AMB-R-002_A
	AV	AT	034	PF	AM	001	AMB D	001	A	Stralcio strumenti di pianificazione urbanistica	VARIE	A1	31/10/2025	G.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-AM001-AMB-D-001_A
SISMICA																			
8	AV	AT	034	PF	SI	001	SIS R	001	A	Relazione sismica con classificazione sismica del territorio	-	A4	31/10/2025	A.S	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-SI001-SIS-R-001_A
PROGETTO STRADALE																			
Asse Principale																			
9	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	001	A	Planimetria di progetto - Tav. 1 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-001_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	002	A	Planimetria di progetto - Tav. 2 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-002_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	003	A	Planimetria di progetto - Tav. 3 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-003_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	004	A	Profilo longitudinale altimetrico - Tav. 1 di 4	1:5000/1:500	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-004_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	005	A	Profilo longitudinale altimetrico - Tav. 2 di 4	1:5000/1:500	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-005_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	006	A	Profilo longitudinale altimetrico - Tav. 3 di 4	1:2000/1:200	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-006_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	007	A	Profilo longitudinale altimetrico - Tav. 4 di 4	1:2000/1:200	A1	31/10/2025	G.M	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-007_A
	AV	AT	034	PF	CS	001	STD D	008	A	Sezioni tipo e particolari costruttivi	1:100	A1	31/10/2025	L.G	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CS001-STD-D-008_A
SEGNALETICA ORIZZONTALE E VERTICALE																			
10	AV	AT	034	PF	SN	001	STD D	001	A	Planimetria interventi di segnaletica orizzontale e verticale - Tav. 1 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-SN001-STD-D-001_A
	AV	AT	034	PF	SN	001	STD D	002	A	Planimetria interventi di segnaletica orizzontale e verticale - Tav. 2 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-SN001-STD-D-002_A
	AV	AT	034	PF	SN	001	STD D	003	A	Planimetria interventi di segnaletica orizzontale e verticale - Tav. 3 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-SN001-STD-D-003_A
	AV	AT	034	PF	SN	001	STD D	004	A	Tipologici	VARIE	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-SN001-STD-D-004_A
BARRIERE DI SICUREZZA																			
11	AV	AT	034	PF	BS	001	BDS D	001	A	Planimetria barriere di sicurezza antirumore - Tav. 1 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-BS001-BDS-D-001_A
	AV	AT	034	PF	BS	001	BDS D	002	A	Planimetria barriere di sicurezza antirumore - Tav. 2 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-BS001-BDS-D-002_A
	AV	AT	034	PF	BS	001	BDS D	003	A	Planimetria barriere di sicurezza antirumore - Tav. 3 di 3	1:2000	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-BS001-BDS-D-003_A
	AV	AT	034	PF	BS	001	BDS D	004	A	Tipologici	VARIE	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-BS001-BDS-D-004_A
OPERE D'ARTE MAGGIORI																			
OPERE ALL'APERTO																			
Cavalcatratta Scavalco A33																			
12	AV	AT	034	PF	CA	001	STR R	001	A	CA01 - Relazione Descrittiva e Tecnica dell'opera	-	A4	31/10/2025	M.G	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CA001-STR-R-001_A
	AV	AT	034	PF	CA	001	STR D	001	A	CA01 - Disegno di insieme	VARIE	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-CA001-STR-D-001_A
Ponte Sul Tanaro																			
	AV	AT	034	PF	PO	001	STR R	001	A	PO01 - Relazione Descrittiva e Tecnica impalcato in misto acciaio-ca	-	A4	31/10/2025	M.G	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-PO001-STR-R-001_A
	AV	AT	034	PF	PO	001	STR R	002	A	PO01 - Relazione Descrittiva e Tecnica dell'opera in c.a.p.	-	A4	31/10/2025	M.G	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-PO001-STR-R-002_A
	AV	AT	034	PF	PO	001	STR D	001	A	PO01 - Disegno di insieme - Tav. 1 di 3	1:200	A0	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-PO001-STR-D-001_A
	AV	AT	034	PF	PO	001	STR D	002	A	PO01 - Disegno di insieme - Tav. 2 di 3	1:200	A0	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-PO001-STR-D-002_A
	AV	AT	034	PF	PO	001	STR D	003	A	PO01 - Disegno di insieme - Tav. 3 di 3	VARIE	A0	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-PO001-STR-D-003_A
Cavalcatratta Torino - As5 RFI																			
	AV	AT	034	PF	VI	001	STR R	001	A	VI01 - Relazione Descrittiva e Tecnica dell'opera	-	A4	31/10/2025	M.G	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-VI001-STR-R-001_A
	AV	AT	034	PF	VI	001	STR D	001	A	VI01 - Disegno di insieme - Tav. 1 di 2	VARIE	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-VI001-STR-D-001_A
	AV	AT	034	PF	VI	001	STR D	002	A	VI01 - Disegno di insieme - Tav. 2 di 2	VARIE	A1	31/10/2025	A.C	AA - D.C.	SIS	-	40	AV-AT-034-PF-VI001-STR-D-002_A

Figura A.1: Elenco elaborati del PFTE — Pag. 1 di 2 [29].

Risvolti applicativi del CAM Strade.
Caso studio relativo al bilancio delle terre
di un progetto di fattibilità tecnico-economica.

INTERVENTI FINALIZZATI AL MIGLIORAMENTO DELLA FUNZIONALITÀ, ACCESSIBILITÀ E FRUIBILITÀ DEL COLLEGAMENTO AUTOSTRADE (ALLEGATO L)																				
REALIZZAZIONE DELLA TANGENZIALE SUD OVEST DI ASTI																				
CODIFICA ELABORATI																				
TRONCO	INTERVENTO	LOTTO	FASE	WBS	N° WBS	DISCIPLINA	TIPO	ELABORATO	REVISIONE	TITOLO ELABORATO	SCALA	FORMATO	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DIGIT	NOTE	WEEK CONSEGNA	NOME FILE
AV	AT	034	PF	PO	002	STR	R	001	A	PO02 - Relazione Descrittiva e Tecnica dell'opera	-	A4	31/10/2025	M.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-PO002-STR-R-001_A
AV	AT	034	PF	PO	002	STR	D	001	A	PO02 - Disegno di insieme	VARIE	A1	31/10/2025	A.C.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-PO002-STR-D-001_A
OPERE IN SOTTERRANEO																				
Galleria Naturale																				
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	R	001	A	Relazione Descrittiva e Tecnica dell'opera	-	A4	31/10/2025	L.G.	G.K.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-R-001_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	001	A	Planimetria generale	12000	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-001_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	002	A	Profilo longitudinale	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-002_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	003	A	Sezioni tipo di intradosso	1.100	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-003_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	004	A	Sezioni tipo - Carpenteria	1.100	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-004_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	005	A	Sezioni tipo di scavo - Sezioni correnti e piazzole	1.100	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-005_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	006	A	Sezioni tipo con nicchia - Carpenteria	1.100	A2	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-006_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	007	A	Profilo di scavo con distribuzione delle sezioni tipo	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-007_A
AV	AT	034	PF	GN	001	STR	D	008	A	Schema planimetrico smaltimento acque	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GN001-STR-D-008_A
Imbocco lato A33																				
AV	AT	034	PF	GA	001	STR	D	009	A	GA01 - Galleria Artificiale - Fase provvisoria - Planimetria e sezioni	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA001-STR-D-009_A
AV	AT	034	PF	GA	001	STR	D	010	A	GA01 - Fase Definitiva - Planimetria e Sezioni	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA001-STR-D-010_A
AV	AT	034	PF	GA	001	STR	D	011	A	GA01 - Galleria Artificiale - Sviluppo parata	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA001-STR-D-011_A
AV	AT	034	PF	GA	001	STR	D	012	A	GA01 - Sezioni - Carpenteria	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA001-STR-D-012_A
Imbocco lato SP10																				
AV	AT	034	PF	GA	002	STR	D	013	A	GA02 - Galleria Artificiale - Fase provvisoria - Planimetria e sezioni	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA002-STR-D-013_A
AV	AT	034	PF	GA	002	STR	D	014	A	GA02 - Fase Definitiva - Planimetria e Sezioni	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA002-STR-D-014_A
AV	AT	034	PF	GA	002	STR	D	015	A	GA02 - Galleria Artificiale - Sviluppo parata	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA002-STR-D-015_A
AV	AT	034	PF	GA	002	STR	D	016	A	GA02 - Sezioni - Carpenteria	VARIE	A1	31/10/2025	P.F.	G.B.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-GA002-STR-D-016_A
OPERE D'ARTE MINORI																				
AV	AT	034	PF	MU	001	STR	D	001	A	Muri di sostegno, tipologici	1.50	A2	31/10/2025	A.C.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-MU001-STR-D-001_A
INTERFERENZE ED ESPROPRI																				
AV	AT	034	PF	IN	001	INT	R	001	A	Relazione sulle principali interferenze	-	A4	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IN001-INT-R-001_A
AV	AT	034	PF	IN	001	INT	D	001	A	Planimetria con individuazione delle principali interferenze	1.5000	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IN001-INT-D-001_A
AV	AT	034	PF	ES	001	ESP	D	001	A	Planimetria Espropri con l'individuazione dell'impronta dell'opera su piano particellare	1.5000	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-ES001-ESP-D-001_A
CANTIERIZZAZIONE																				
AV	AT	034	PF	CN	001	CAN	D	001	A	Corografia con ubicazione dei siti di cava, conferimento, deposito temporaneo e di scarica	125000	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-CN001-CAN-D-001_A
AV	AT	034	PF	CN	001	CAN	D	002	A	Planimetria dei siti di cava, conferimento, deposito temporaneo e di scarica	110000	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-CN001-CAN-D-002_A
AV	AT	034	PF	CN	001	CAN	D	003	A	Planimetrie aree di cantiere e sistemazione tipo aree di deposito	VARIE	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-CN001-CAN-D-003_A
AV	AT	034	PF	CN	001	CPR	R	001	A	Cronoprogramma	VARIE	A1	31/10/2025	A.C.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-CN001-CPR-R-001_A
IMPIANTI TECNOLOGICI																				
OPERE ALL'APERTO																				
AV	AT	034	PF	IM	001	IMP	D	001	A	Planimetria con individuazione impianti	1.5000	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM001-IMP-D-001_A
AV	AT	034	PF	IM	001	IMP	D	002	A	Particolari e tipologici illuminazione all'aperto	VARIE	A1	31/10/2025	L.G.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM001-IMP-D-002_A
OPERE IN GALLERIA																				
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	001	A	Planimetria impianti di ventilazione e analisi ambientali	VARIE	A0	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-001_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	002	A	Planimetria impianti TVCC e diffusione sonora	VARIE	A0	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-002_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	003	A	Planimetria impianti di telecontrollo	VARIE	A0	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-003_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	004	A	Planimetria impianto idrico antincendio	VARIE	A0	31/10/2025	A.B.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-004_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	005	A	Planimetria impianto rilevazione incendi	VARIE	A0	31/10/2025	A.B.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-005_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	006	A	Planimetria vie cavo e impianto di illuminazione	VARIE	A0	31/10/2025	S.D.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-006_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	007	A	Planimetria segnaletica luminosa	VARIE	A0	31/10/2025	A.B.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-007_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	008	A	Planimetria impianto radio	VARIE	A0	31/10/2025	A.B.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-008_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	009	A	Profilo longitudinale impianti	VARIE	A1	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-009_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	010	A	Planimetria e sezioni impianto meccanico cabine CE1 e CE2	VARIE	A1	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-010_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	011	A	Planimetria e sezioni impianto elettrico cabina CE1 incendi	VARIE	A1	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-011_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	D	012	A	Planimetria e sezioni impianto elettrico cabina CE2	VARIE	A1	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-D-012_A
AV	AT	034	PF	IM	002	IMP	R	001	A	Relazione impiantistica	-	A1	31/10/2025	D.R.	M.S.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-IM002-IMP-R-001_A
PIANO DI SICUREZZA E COORDINAMENTO																				
AV	AT	034	PF	SC	001	PSC	R	001	A	Prime indicazioni per la redazione del Piano della Sicurezza	-	A4	31/10/2025	M.P.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-SC001-PSC-R-001_A
DOCUMENTAZIONE ECONOMICA																				
AV	AT	034	PF	DE	001	CST	E	001	A	Documentazione tecnico-economica	-	A4	31/10/2025	A.T.C.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-DE001-CST-E-001_A
AV	AT	034	PF	DE	001	CST	E	002	A	Quadro economico	-	A4	31/10/2025	A.T.C.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-DE001-CST-E-002_A
DOCUMENTAZIONE TECNICO AMMINISTRATIVA																				
AV	AT	034	PF	DT	001	TAM	R	001	A	Capitolato speciale prestazionale	-	A4	31/10/2025	M.P.	A.A. - D.C.	SIS	-	-	40	AV-AT-034-PF-DT001-TAM-R-001_A

Figura A.2: Elenco elaborati del PFTE — Pag. 2 di 2 [29].



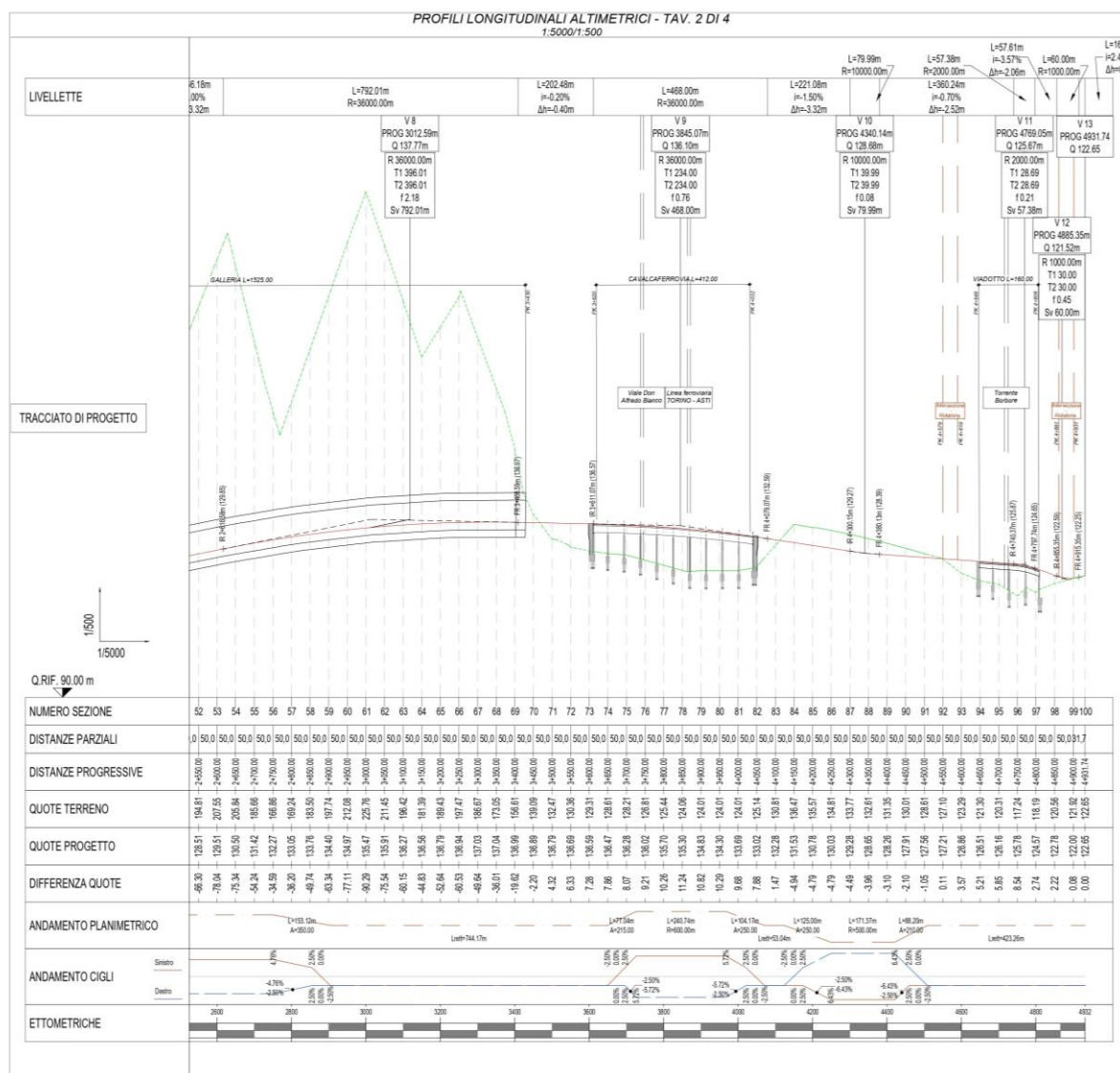


Figura A.4: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 2 di 4 [41]

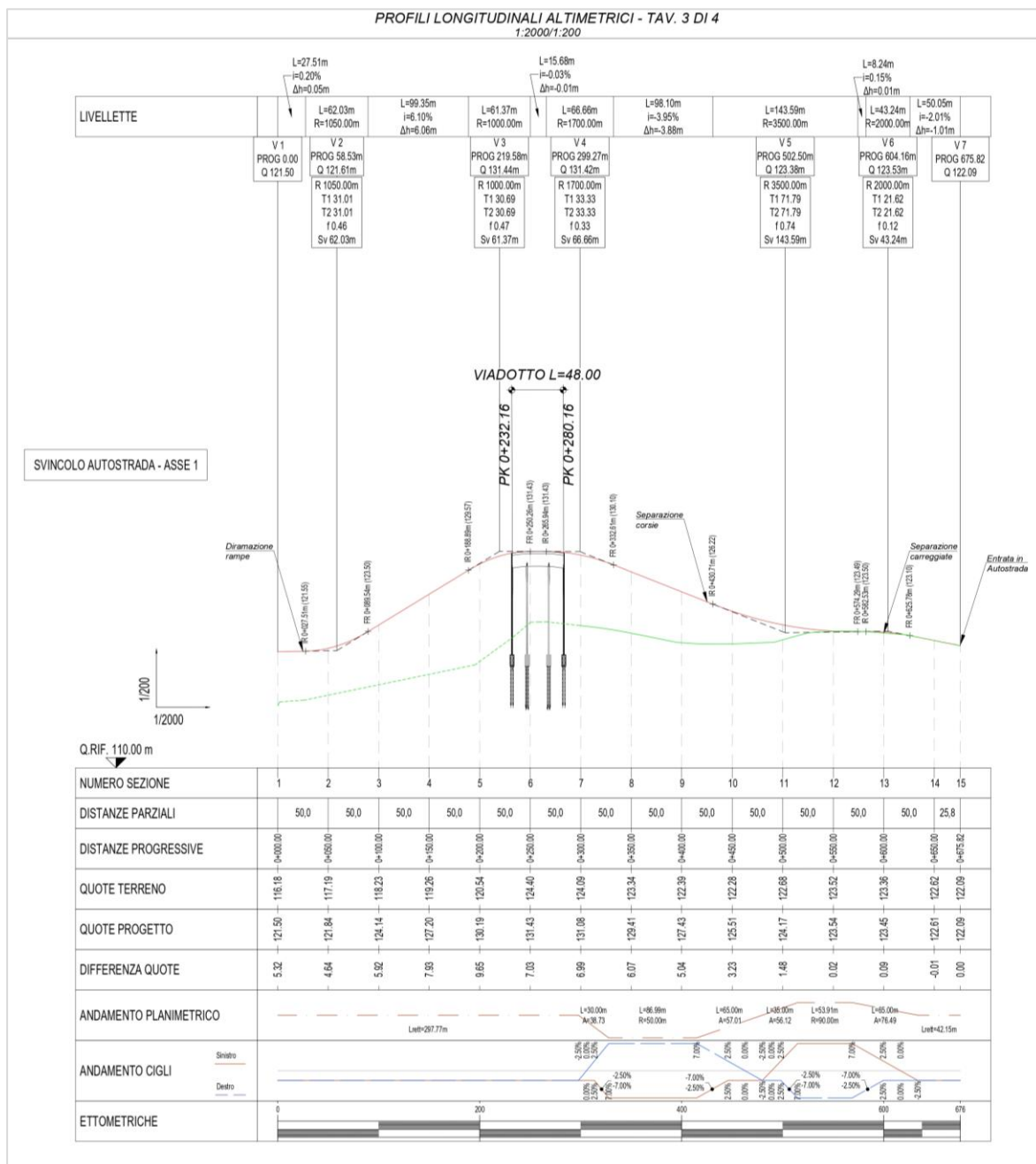


Figura A.5: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 3 di 4 [42].

Risvolti applicativi del CAM Strade.
Caso studio relativo al bilancio delle terre
di un progetto di fattibilità tecnico-economica.

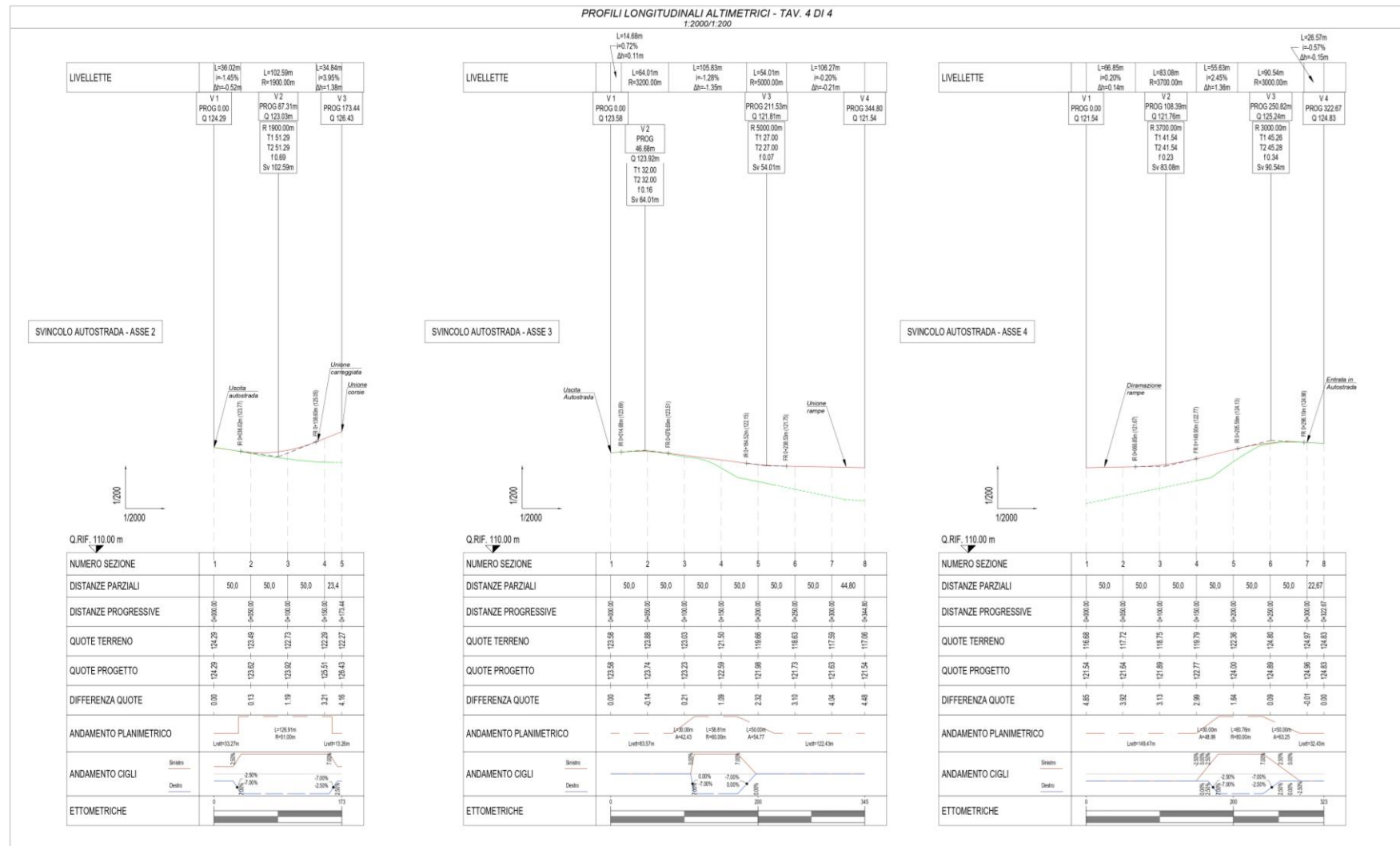


Figura A.6: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 4 di 4 [43].

Risvolti applicativi del CAM Strade.
Caso studio relativo al bilancio delle terre
di un progetto di fattibilità tecnico-economica.

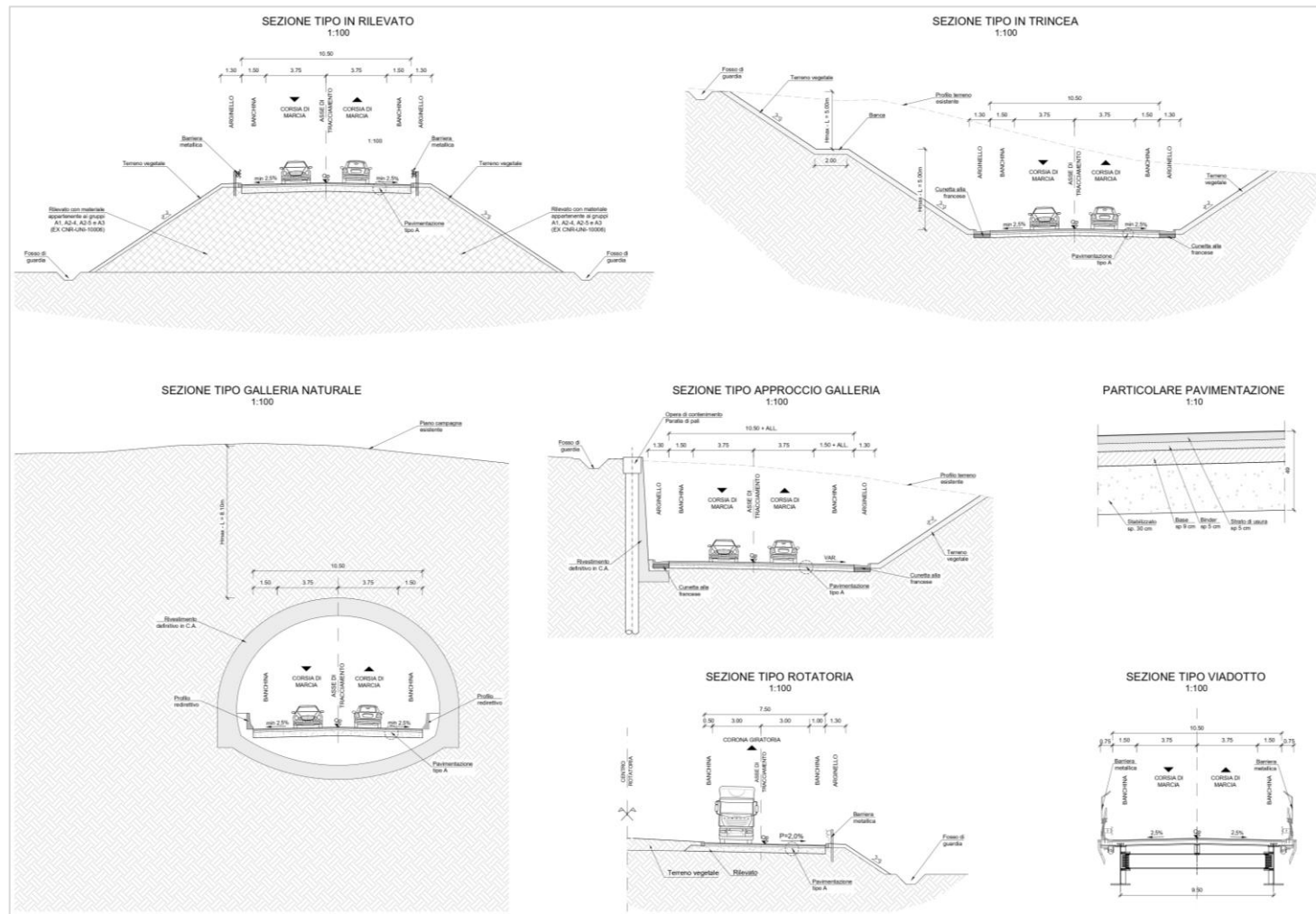


Figura A.7: Sezioni tipo e particolari costruttivi [44]

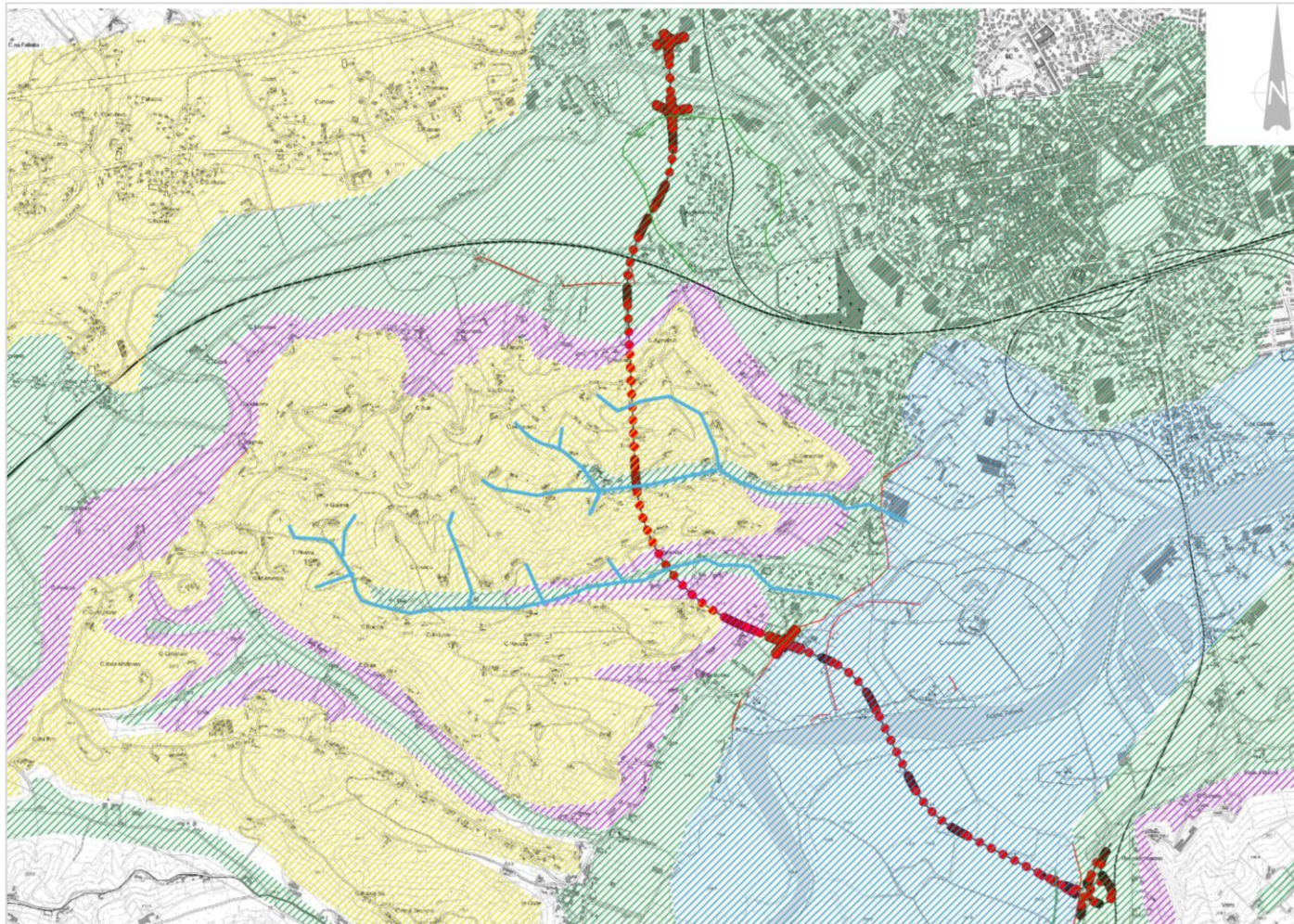


Figura A.8: Carta geologico-geomorfologica [34]. Nell'analisi sono stati considerati i tre complessi litologici del corpo stradale in rilevato e trincea. La quarta litologia visibile nella carta non è attraversata dal tracciato oggetto di studio.

Appendice B — Tabelle di dettaglio dell'analisi

Si riportano di seguito le rappresentazioni grafiche dei volumi di materiale scavato e di riporto per ciascuno scenario, a integrazione delle Tabelle 4.4 e 4.5.

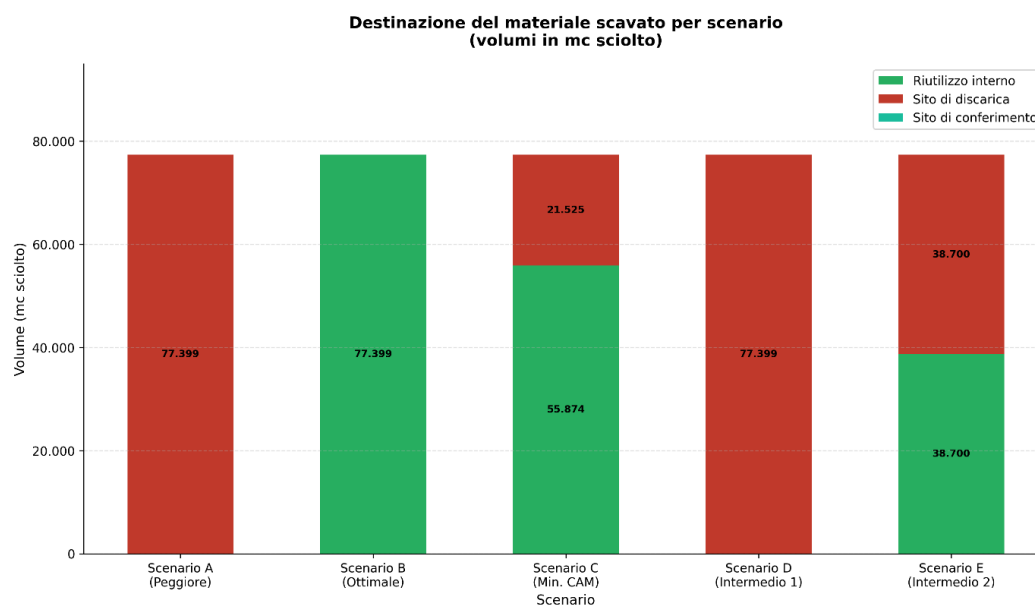


Figura B.1: Destinazione del materiale scavato per scenario (volumi in mc sciolto). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.

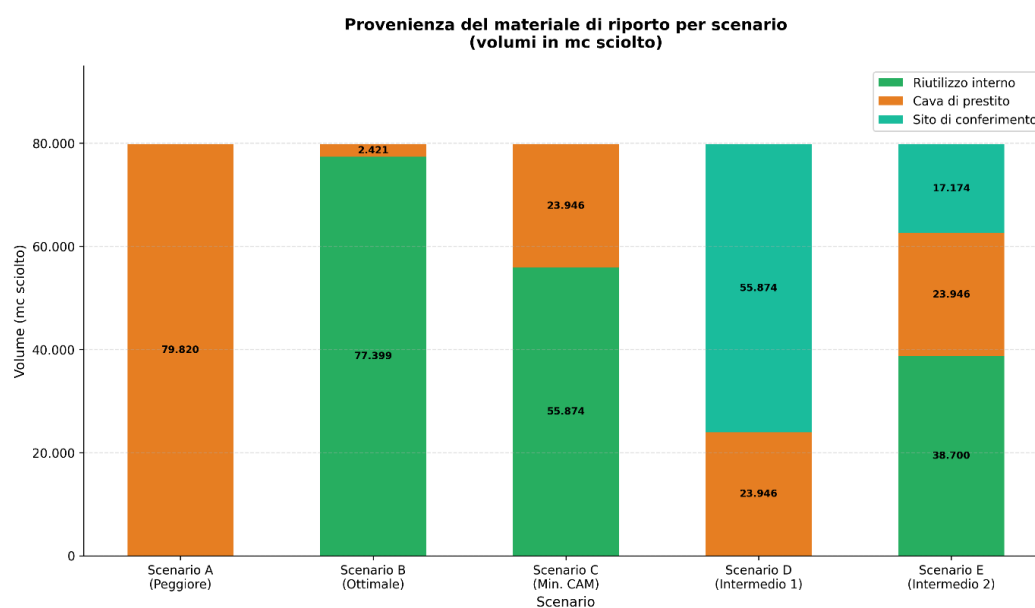


Figura B.2: Provenienza del materiale di riporto per scenario (volumi in mc sciolto). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.

Si riportano di seguito le tabelle di dettaglio relative al numero di viaggi per tratta e per scenario e ai tempi di ciclo per mezzo, a supporto dei calcoli dei veh·km descritti nel paragrafo 4.4.1.

Tabella B.1: Numero di viaggi per tratta e per scenario — Autocarro (10 mc)

Tratta	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
Sito di discarica	7.740	0	2.153	7.740	3.870
Sito di cava	7.982	243	2.395	2.395	2.395
Movimenti interni	0	7.740	5.588	0	3.870
Sito di conferimento	0	0	0	5.588	1.718

Tabella B.2: Numero di viaggi per tratta e per scenario — Autoarticolato (20 mc)

Tratta	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
Sito di discarica	3.870	0	1.077	3.870	1.935
Sito di cava	3.991	122	1.198	1.198	1.198
Movimenti interni	0	3.870	2.794	0	1.935
Sito di conferimento	0	0	0	2.794	859

Tabella B. 3: Tempi di ciclo per tratta e viaggi/mezzo/giorno

Tratta	Dist. A/R (km)	Velocità (km/h)	T. percorrenza (h)	T. ciclo (h)	Viaggi/mezzo /giorno
Sito di discarica	69,6	40	1,74	2,24	3
Sito di cava	46,8	40	1,17	1,67	4
Movimenti interni	4,0	20	0,20	0,70	11
Sito di conferimento	32,6	40	0,82	1,32	6

Si riportano di seguito le tabelle di dettaglio relative alle mezzo-giornate necessarie per tratta e per scenario, a supporto del calcolo dei giorni lavorativi descritti nel paragrafo 4.4.2.

Tabella B.4: Mezzo-giornate per tratta e per scenario — Autocarro (10 mc)

Tratta	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
Sito di discarica	2.580	0	718	2.580	1.290
Sito di cava	1.996	61	599	599	599
Movimenti interni	0	704	508	0	352
Sito di conferimento	0	0	0	931	286
Totale	4.576	765	1.825	4.110	2.527

Tabella B.5: Mezzo-giornate per tratta e per scenario — Autoarticolato (20 mc)

Tratta	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
Sito di discarica	1.290	0	359	1.290	645
Sito di cava	998	31	300	300	300
Movimenti interni	0	352	254	0	176
Sito di conferimento	0	0	0	466	143
Totale	2.288	383	913	2.056	1.264

Formula eq.(25) — Fattore di consumo energetico ECF

Il fattore di consumo energetico ECF [MJ/km] è calcolato mediante la formula generica eq.(25) del Guidebook EMEP/EEA[37], valida per tutte le categorie veicolari:

$$ECF = \frac{\left(\alpha \cdot V^2 + \beta \cdot V + \gamma + \frac{\delta}{V}\right)}{(\varepsilon \cdot V^2 + \zeta \cdot V + \eta)} \cdot (1 - RF)$$

Dove:

- ECF = Energy Consumption Factor [MJ]/km];
- V = velocità media [km/h];
- α , β , γ , δ , ε , ζ , η = coefficienti empirici specifici per categoria veicolare, standard emissivo, pendenza e fattore di carico, ricavati dall'Appendice 4 del Guidebook EMEP/EEA (COPERT v5.9.1)[37].

Tabella B.6: Coefficienti eq.(25) — Diesel, Euro VI A/B/C, DPF+SCR, slope=0, load=0,5

Coefficiente	Autocarro Rigido 14–20 t	Autoarticolato 34–40 t
α	0,002741	0,004902
β	−0,334758	−0,665314
γ	16,031853	31,694687
δ	48,355101	25,921315
ϵ	0	0
ζ	0	0
η	1	1
RF	0	0
Range validità [km/h]	5–80	5–80

Appendice C — Codice Python

Si riporta di seguito una parte del codice Python utilizzato per la generazione dei grafici delle Figure 4.4, 4.5, 4.7, 4.8, 4.9 e delle Figure B.1 e B.2. Il codice completo per la visualizzazione è strutturato con la libreria Matplotlib di Python.

```
import matplotlib.pyplot as plt

import numpy as np

import os

OUTPUT_DIR = r'C:\Users\david\Desktop'

scenari = [

    'Scenario A\n(Peggior)',

    'Scenario B\n(Ottimale)',

    'Scenario C\n(Min. CAM)',

    'Scenario D\n(Intermedio 1)',

    'Scenario E\n(Intermedio 2)'

]

# GRAFICO 1 – Destinazione sterro (mc sciolto)

riutilizzo_out = [0, 77398.99, 55873.93, 0, 38699.50]

discarica = [77398.99, 0, 21525.06, 77398.99, 38699.49]

conferimento_out = [0, 0, 0, 0, 0]

# GRAFICO 2 – Provenienza riporto (mc sciolto)

riutilizzo_in = [0, 77398.99, 55873.93, 0, 38699.50]

cava = [79819.90, 2420.91, 23945.97, 23945.97, 23945.97]

conferimento_in = [0, 0, 0, 55873.93, 17174.43]
```

GRAFICI 3 & 4 – Veh·km totali

vehkm_autocarro = [912261.60, 42332.40, 284286.80, 832958.80, 452924.80]

vehkm_autoarticolato = [456130.80, 21189.60, 142201.60, 416502.80, 226485.80]

GRAFICI 5 & 6 – CO2

co2_autocarro = [556.76, 36.42, 181.15, 508.36, 281.72]

co2_autoarticolato = [458.78, 30.57, 149.71, 418.92, 232.43]

GRAFICO 7 – Giorni lavorativi (5 mezzi)

giorni_autocarro = [916, 153, 365, 823, 506]

giorni_autoarticolato = [458, 77, 183, 412, 253]

=====

COLORI

=====

COL_RIU = '#27AE60'

COL_DIS = '#C0392B'

COL_CONF = '#1ABC9C'

COL_CAVA = '#E67E22'

COLORI_SCENARI = [COL_DIS, COL_RIU, COL_CONF, COL_DIS, COL_CAVA]

COL_AUTOCARRO = '#1A5276'

COL_AUTOARTICOLATO = '#E67E22'

Indice delle figure

Figura 1.1: Percorso dell'UE verso una prosperità economica duratura e la neutralità climatica, 1990-2050[3].	8
Figura 1.2: Le proposte legislative del pacchetto Fit for 55.[6].	10
Figura 1.3: Trend delle emissioni dirette di GHG e indici di riduzione nel settore nazionale dei trasporti secondo il Green Deal Europeo[14].	14
Figura 1.4: Approccio gerarchico "Build Nothing – Build Less – Build Clever – Build Efficiently"[15].	15
Figura 2.1: Percentuali minime di materiale recuperato, riciclato o sottoprodotto per il corpo stradale[20].	20
Figura 2.2: Fasi da comprendere nell'analisi LCA[20].	22
Figura 3.1: Corografia di inquadramento della Tangenziale Sud Ovest di Asti[27].	25
Figura 3.2: Tracciato stradale - Alternative progettuali[31].	27
Figura 3.3: Planimetria delle aree di cantiere[32].	29
Figura 4.1: ECF [MJ/km] in funzione della velocità media — HDV Diesel, Euro VI A/B/C, slope=0, load=0,5. Fonte: elaborazione propria su dati EMEP/EEA COPERT v5.9.1 [37].	44
Figura 4.2: Fattori di emissione di CO ₂ [38].	45
Figura 4.3: CO ₂ [g/km] in funzione della velocità media — HDV Diesel, Euro VI A/B/C, slope=0, load=0,5. Fonte: elaborazione propria su dati EMEP/EEA COPERT v5.9.1 [37].	46
Figura 4.4: Veh·km totali per scenario — Autocarro (10 mc). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.	48
Figura 4.5: Veh·km totali per scenario — Autoarticolato (20 mc). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.	49
Figura 4.6: Riduzione percentuale dei veh·km rispetto allo scenario di riferimento. Elaborazione propria.	50
Figura 4.7: Giorni lavorativi necessari per scenario con 5 mezzi — confronto tra autocarro (10 mc) e autoarticolato (20 mc). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.	51
Figura 4.8: Emissione totale di CO ₂ per scenario — Autocarro (10 mc). Elaborazione propria.	52
Figura 4.9: Emissione totale di CO ₂ per scenario — Autoarticolato (20 mc). Elaborazione propria.	53
Figura A.1: Elenco elaborati del PFTE — Pag. 1 di 2 [29].	62
Figura A.2: Elenco elaborati del PFTE — Pag. 2 di 2 [29].	63
Figura A.3: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 1 di 4 [40].	64
Figura A.4: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 2 di 4 [41].	65
Figura A.5: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 3 di 4 [42].	66
Figura A.6: Profili longitudinali altimetrici — Tav. 4 di 4 [43].	67
Figura A.7: Sezioni tipo e particolari costruttivi [44].	68
Figura A.8: Carta geologico-geomorfologica [34]. Nell'analisi sono stati considerati i tre complessi litologici del corpo stradale in rilevato e trincea. La quarta litologia visibile nella carta non è attraversata dal tracciato oggetto di studio.	69
Figura B.1: Destinazione del materiale scavato per scenario (volumi in mc sciolto). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre.	70

Figura B.2: Provenienza del materiale di riporto per scenario (volumi in mc sciolto). Elaborazione propria tramite script Python su dati del bilancio delle terre..... 70

Indice delle tabelle

Tabella 4.1: Coefficienti volumetrici di rigonfiamento totale (ε) e residuo (ε') delle terre per trasporti e rilevati[35].	33
Tabella 4.2: Volumi di sterro (stato banco) e riporto (stato compattato di progetto) estratti dal CutFillReport.	35
Tabella 4.3: Conversione volumetrica sterro e riporto con coefficienti ε e ε' .	35
Tabella 4.4: Destinazione del materiale scavato per scenario (mc sciolto).	36
Tabella 4.5: Provenienza del materiale di riporto per scenario (mc sciolto).	36
Tabella 4.6: Sintesi degli scenari e conformità ai CAM Strade	39
Tabella 4.7: Veh·km per tratta e per scenario — Autocarro (10 mc)	40
Tabella 4.8: Veh·km per tratta e per scenario — Autoarticolato (20 mc)	40
Tabella 4.9: Parametri di pianificazione del trasporto	41
Tabella 4.10: Tabella fleet - giorni lavorativi necessari - autocarro 10 mc	42
Tabella 4.11: Tabella fleet - giorni lavorativi necessari — autoarticolato 20 mc	43
Tabella 4.12: Emissione totale di CO ₂ [t] — autocarro 10 mc	47
Tabella 4.13: Emissione totale di CO ₂ [t] — autoarticolato 20 mc	47
Tabella B.1: Numero di viaggi per tratta e per scenario — Autocarro (10 mc)	71
Tabella B.2: Numero di viaggi per tratta e per scenario — Autoarticolato (20 mc)	71
Tabella B. 3: Tempi di ciclo per tratta e viaggi/mezzo/giorno	71
Tabella B.4: Mezzo-giornate per tratta e per scenario — Autocarro (10 mc)	72
Tabella B.5: Mezzo-giornate per tratta e per scenario — Autoarticolato (20 mc)	72
Tabella B.6: Coefficienti eq.(25) — Diesel, Euro VI A/B/C, DPF+SCR, slope=0, load=0,5	73

Bibliografia

- [1] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell'edilizia, (rifusione), (Testo rilevante ai fini del SEE)*. 2024. [Online]. Disponibile su: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=OJ%3AL_202401275
- [2] Commissione Europea, «Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni — Il Green Deal europeo». Bruxelles, 11 dicembre 2019. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- [3] Commissione Europea, «Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni — Un traguardo climatico 2030 più ambizioso per l'Europa». Bruxelles, 17 settembre 2020. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>
- [4] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica («Normativa europea sul clima»)*. 2021. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- [5] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (UE) 2026/667 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 marzo 2026 recante modifica del regolamento (UE) 2021/1119 per quanto riguarda la fissazione di un traguardo climatico intermedio dell'Unione per il 2040*. 2026. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2026/667/oj>
- [6] «Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni — Fit for 55: conseguire l'obiettivo climatico dell'UE per il 2030 nel percorso verso la neutralità climatica». Bruxelles, 14 luglio 2021. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>
- [7] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 giugno 2020 relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili (Tassonomia Verde)*. 2020. [Online]. Disponibile su: <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj>
- [8] Commissione delle Comunità Europee, «Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo — Politica integrata dei prodotti: sviluppare il concetto di ciclo di vita ambientale». Bruxelles, 18 giugno 2003. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2003:0302:FIN:IT:PDF>
- [9] Commissione delle Comunità Europee, «Comunicazione della Commissione al Consiglio, al Parlamento Europeo, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni — Appalti pubblici per un ambiente migliore». Bruxelles, 16 luglio 2008. [Online]. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52008DC0400>

- [10] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36 — Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78*. 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2023-03-31;36>
- [11] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Decreto 11 aprile 2008 — Approvazione del Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione (PAN GPP)*. 2008. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2008/05/08/08A02999/sg>
- [12] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Decreto 10 aprile 2013 — Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione - revisione 2013 (PAN GPP)*. 2013. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/05/03/13A03799/sg>
- [13] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 18 aprile 2016, n. 50 — Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture (Codice dei contratti pubblici)*. 2016. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/04/19/16G00062/sg>
- [14] C. Carraro, «Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità — Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra». Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS), Roma, 2022. [Online]. Disponibile su: https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-02/Rapporto_Carraro_Mims.pdf
- [15] O. Baglieri, «Decarbonizzare i processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali. Quadro di riferimento, strategie e pratiche tecniche». PIARC — Associazione Mondiale della Strada, 2026. [Online]. Disponibile su: https://piarc-italia.it/wp-content/uploads/2019/09/Report-TF-4.5_Finale_.pdf
- [16] Presidenza del Consiglio dei Ministri, *Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell'articolo 8 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 novembre 2014, n. 164*. 2017. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2017/08/07/17G00135/sg>
- [17] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 — Norme in materia ambientale*. 2006. [Online]. Disponibile su: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152>
- [18] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Decreto 11 ottobre 2017 — Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*. 2017. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2017/11/06/17A07439/sg>
- [19] Ministero della Transizione Ecologica, *Decreto 23 giugno 2022, n. 256 — Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi*. 2022.

- [Online]. Disponibile su:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/06/22A04307/sg>
- [20] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Decreto 5 agosto 2024 — Adozione dei criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali (CAM Strade)*. 2024. [Online]. Disponibile su: https://gpp.mase.gov.it/sites/default/files/2024-08/20240823_197-re.pdf
- [21] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Decreto 11 settembre 2025 — Modifiche all'allegato 1 del decreto 5 agosto 2024, recante «Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali — CAM Strade»*. 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2025/09/23/25A05133/sg>
- [22] *Sustainability of construction works — Framework for assessment of buildings and civil engineering works*, UNI EN 15643:2021, 2021.
- [23] *Sustainability of construction works — Sustainability assessment of civil engineering works — Calculation methods*, UNI EN 17472:2022, 2022.
- [24] *Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products*, UNI EN 15804:2021, 2021.
- [25] *Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures*, ISO 14025:2006, 2006.
- [26] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Decreto 5 novembre 2001 — Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*. 2001. [Online]. Disponibile su: <https://www.mit.gov.it/normativa/decreto-ministeriale-protocollo-6792-del-05112001>
- [27] Masera Engineering Group S.r.l., «Relazione illustrativa e tecnica — Inquadramento dell'intervento». ottobre 2025.
- [28] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 12 aprile 2006, n. 163 — Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE*. 2006. [Online]. Disponibile su: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-12;163>
- [29] Masera Engineering Group S.r.l., «Elenco Elaborati». 31 ottobre 2025.
- [30] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 — Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137*. 2004. [Online]. Disponibile su: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2004-02-24&atto.codiceRedazionale=004G0066
- [31] Masera Engineering Group S.r.l., «Tracciato stradale - Alternative progettuali». ottobre 2025.

- [32] Masera Engineering Group S.r.l., «Planimetrie aree di cantiere e sistemazione tipo aree di deposito». 31 ottobre 2025.
- [33] Masera Engineering Group S.r.l., «Planimetria dei siti di cava, conferimento, deposito temporaneo e di discarica». 31 ottobre 2025.
- [34] Masera Engineering Group S.r.l., «Carta geologico-geomorfologica». 31 ottobre 2025.
- [35] «Rigonfiamento delle terre (dopo gli scavi)». Zanichelli Editore S.p.A., Bologna, 2009.
- [36] Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 30 aprile 1992, n. 285 — Nuovo codice della strada*. 1992. [Online]. Disponibile su:
<https://www.normattiva.it/eli/id/1992/05/18/092G0306/CONSOLIDATED>
- [37] European Environment Agency (EEA), «EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023 – Update 2025, Chapter 1.A.3.b.i-iv Road transport». ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://copert.emisia.com/wp-content/uploads/2025/10/1.A.3.b.i-iv-Road-transport-2025.pdf>
- [38] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories — Volume 2: Energy». IGES (Institute for Global Environmental Strategies), Hayama, Giappone, 2006.
- [39] Masera Engineering Group S.r.l., «Capitolato Speciale Prestazionale». 31 ottobre 2025.
- [40] Masera Engineering Group S.r.l., «Profili longitudinali altimetrici - Tav. 1 di 4». 31 ottobre 2025.
- [41] Masera Engineering Group S.r.l., «Profili longitudinali altimetrici - Tav. 2 di 4». 31 ottobre 2025.
- [42] Masera Engineering Group S.r.l., «Profili longitudinali altimetrici - Tav. 3 di 4». 31 ottobre 2025.
- [43] Masera Engineering Group S.r.l., «Profili longitudinali altimetrici - Tav. 4 di 4». 31 ottobre 2025.
- [44] Masera Engineering Group S.r.l., «Sezioni tipo e particolari costruttivi». 31 ottobre 2025.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare di cuore tutti coloro che hanno contribuito, ognuno a modo suo, alla realizzazione di questa tesi.

Prima di tutto, un ringraziamento al mio relatore Orazio Baglieri e ai miei correlatori Davide Masera e Daniele Calia che hanno contribuito, durante tutto il percorso della tesi, a farmi raggiungere tale obiettivo con costanza e professionalità. Siete stati una grande fonte di ispirazione, la vostra esperienza è stata essenziale. Un ringraziamento speciale va a Daniele, nonostante i numerosi impegni, ha sempre trovato del tempo per supportarmi e sopportarmi anche nei momenti difficili.

Un grazie speciale a Masera Engineering Group S.r.l. che mi ha dato la possibilità di svolgere la tesi in azienda, permettendomi di applicare concretamente quanto appreso durante il percorso di studi.

Grazie ai miei genitori che mi hanno supportato durante tutto il percorso, non facendomi mai sentire in difetto e garantendomi sempre un punto di riferimento sicuro.

Un grazie a mia sorella Jessica compare di battibecchi, che nonostante la distanza e le nostre vite sempre più indipendenti, rimane comunque una parte fondamentale della mia vita.

Un grazie speciale ai miei nonni, che con il loro amore e la loro grande saggezza mi hanno sempre incoraggiato a non mollare mai. Un pensiero speciale va a te, Arnaldo, che non hai potuto vedere fisicamente il raggiungimento di questo importante traguardo, so che avresti voluto esserci e forse sei qua, vicino molto vicino, mentre scrivo queste poche righe, sono sicuro che saresti orgoglioso di me.

Grazie ai miei amici che hanno sempre creduto in me nel conseguimento di questo traguardo, facendomi svagare nei momenti critici, con i giochi da tavolo avete salvato la mia poca sanità mentale rimasta. Un ringraziamento speciale a te Riccardo, mio migliore amico da così tanti anni che ho addirittura perso il conto. Se sono la persona di oggi è principalmente grazie a te.

Un ultimo ringraziamento, ma non ultimo per importanza, va a te Choco, mio fedele cagnolino, compagno di scrittura, anche ora coricato vicino a me mentre scrivo queste righe, la tua presenza ha reso le lunghe sessioni di lavoro molto più piacevoli.